

Amélioration des propriétés mécaniques des métaux

Traitement thermique des aciers

Chapitre 6.1.5
Chapitre 10



Introduction

- Que peut-on faire pour améliorer les propriétés mécaniques d'un métal?
- Métaux ferreux :
  - Aciers et fontes : 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques;
  - Age du fer;
  - Bon marché;
  - On peut modifier leur propriétés en additionnant des éléments d' alliage et aussi en faisant des traitements thermiques;
  - Acier au carbone d'usage général, aciers de traitements thermiques alliés ou non, aciers à outil, aciers inoxydable.



MEC-200

Contenu

- Introduction
- Transformation de phases
  - Introduction
  - Cinétique des réactions : vitesse de transformation
  - Transformation isothermes :
    - Formation de la perlite;
    - Formation de la bainite;
    - Formation de la martensite et de la martensite de revenu;
    - Formation de la sphéroïdite.
- Traitement thermique des aciers
  - Traitement thermique dans la masse : trempabilité
  - Traitements de surface
  - Les récuits
  - Transformation en refroidissement continu



MEC-200

Objectifs des traitements thermiques des alliages ferreux

- But : Contrôler les propriétés de mise en forme, mécaniques, autres.
- Moyen : Modifier la microstructure.
  - Provoquer la formation des microstructures favorables pour la mise en forme et pour améliorer les propriétés mécaniques.
- Comment : Traitement thermique
  - Modifier la nature des constituants présents.
  - Modifier la forme et la répartition des constituants.
  - Atténuer les hétérogénéités de composition chimique.
- Conséquences :
  - Élimination des contraintes internes et modification de leur répartition avec modification de la microstructure.
  - Rétablit les propriétés d'un acier écrouit

MEC-200

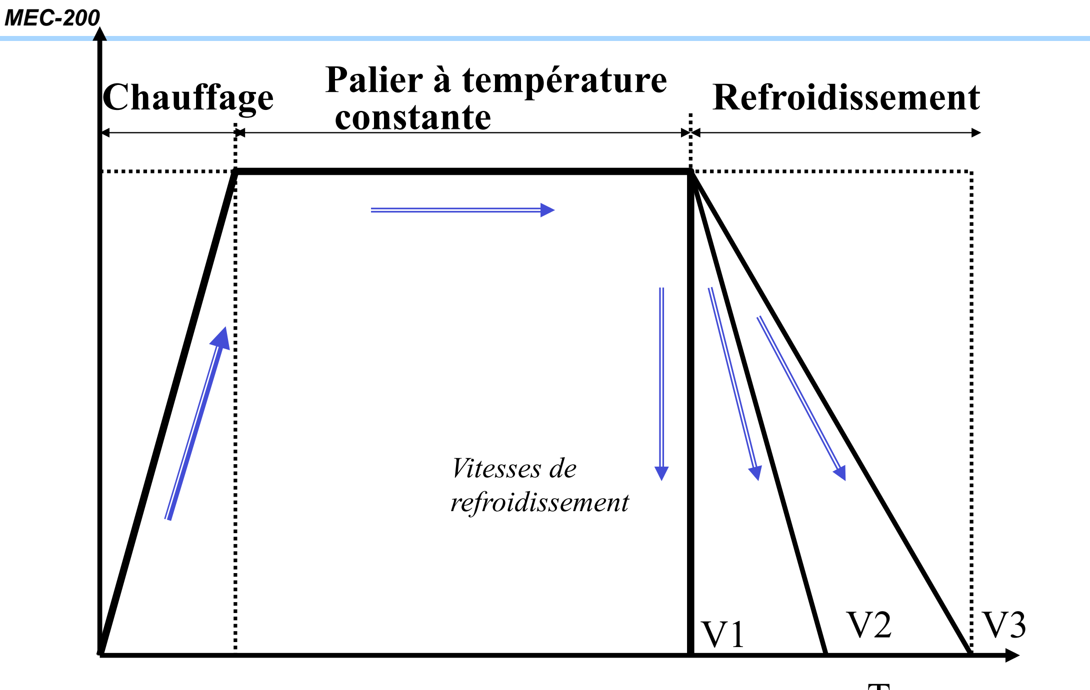
Traitements thermiques des alliages ferreux

- Modifier la nature des constituants présents :
  - durcissement par trempe,
  - durcissement par précipitation,
  - recuit et traitement par froid.
- Modifier la forme et la répartition des constituants :
  - recuit de globulisation,
  - traitement d'affinage structural,
  - recuit de grossissement du grain,
  - recuit de recristallisation,
  - traitement de normalisation.



Étapes d'un traitement thermique

MEC-200

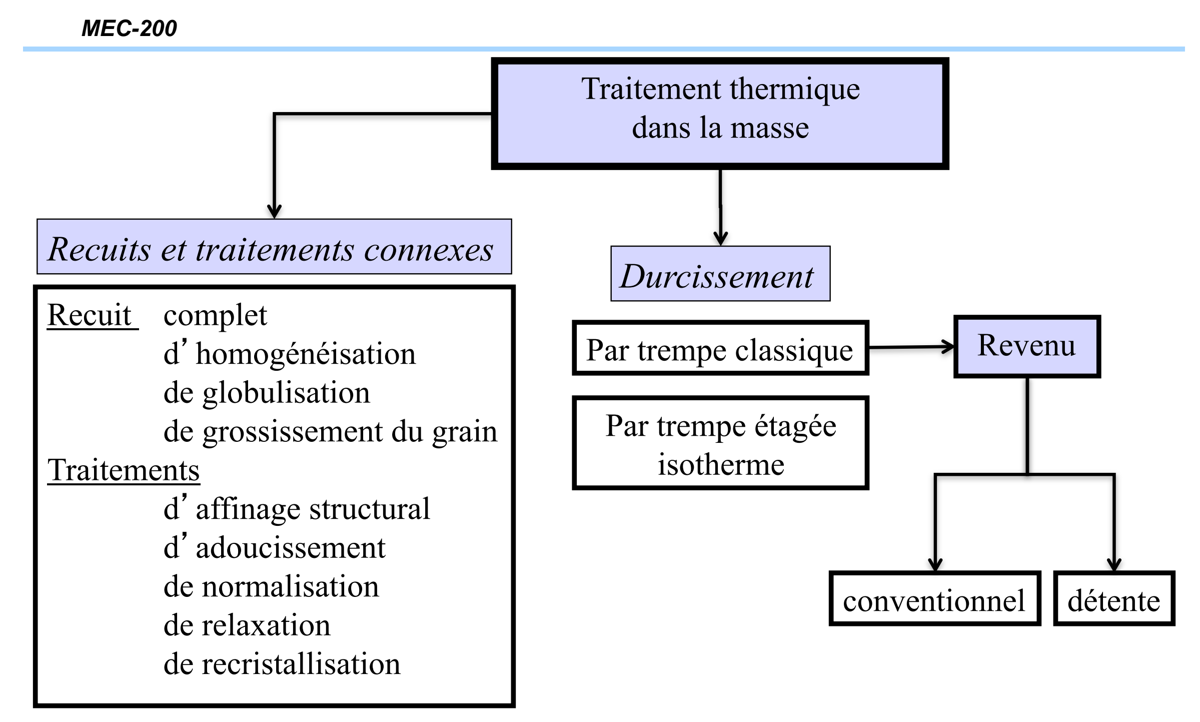


Facteurs influençant les propriétés d'un traitement thermique

- température de traitement;
- temps de maintien à la température de traitement;
- nuance (type d'alliage) du matériau;
- travaux antérieurs effectués sur le matériau;
- nombre de cycles (nombre de traitements);
- mode de vieillissement :
    - Vitesse de refroidissement,
    - Type et température du milieu de trempe,
    - Agitation du milieu de trempe.



Traitements thermique des produits ferreux





MEC-200

Identification de l'état d'un matériau

- F Tel que fabriqué
- O Recuit, recristallisé
- W Trempe instable
- T Traitement thermique
  - » T 3 Mise en solution, écroui et vieilli : produit rigide
  - » T 4 Semblable au T3 mais sans écrouissage
  - » T 6 Mise en solution et revenu : produit très rigide
  - » T 7 Mise en solution et stabilisé
  - » T 8 Mise en solution, écroui et vieilli artificiellement



MEC-200

Contenu

- Introduction
- Transformation de phases
  - Introduction
  - Cinétique des réactions : vitesse de transformation
  - Transformation isothermes :
    - Formation de la perlite;
    - Formation de la bainite;
    - Formation de la martensite et de la martensite de revenu;
    - Formation de la sphéroïdite.
- Traitement thermique des aciers
  - Traitement thermique dans la masse : trempabilité
  - Traitements de surface
  - Les récuits
  - Transformation en refroidissement continu



Aciers et fontes

- 90 % en masse de la production mondiale des alliages métalliques.
- <u>Atouts :</u>
  - Les composés contenant du fer existent en grande quantité sur la croute terrestre.
  - La fabrication des alliages ferreux est peu coûteuse.
  - Grande souplesse de mise en forme.
- <u>Inconvénients :</u>
  - Très succeptible à la corrosion.
  - Lourds : Aciers : 7.86 g/cm^3; Inox : 7.6 à 8 g/cm^3
    - Fontes : 7.1 à 7.3 g/cm^3

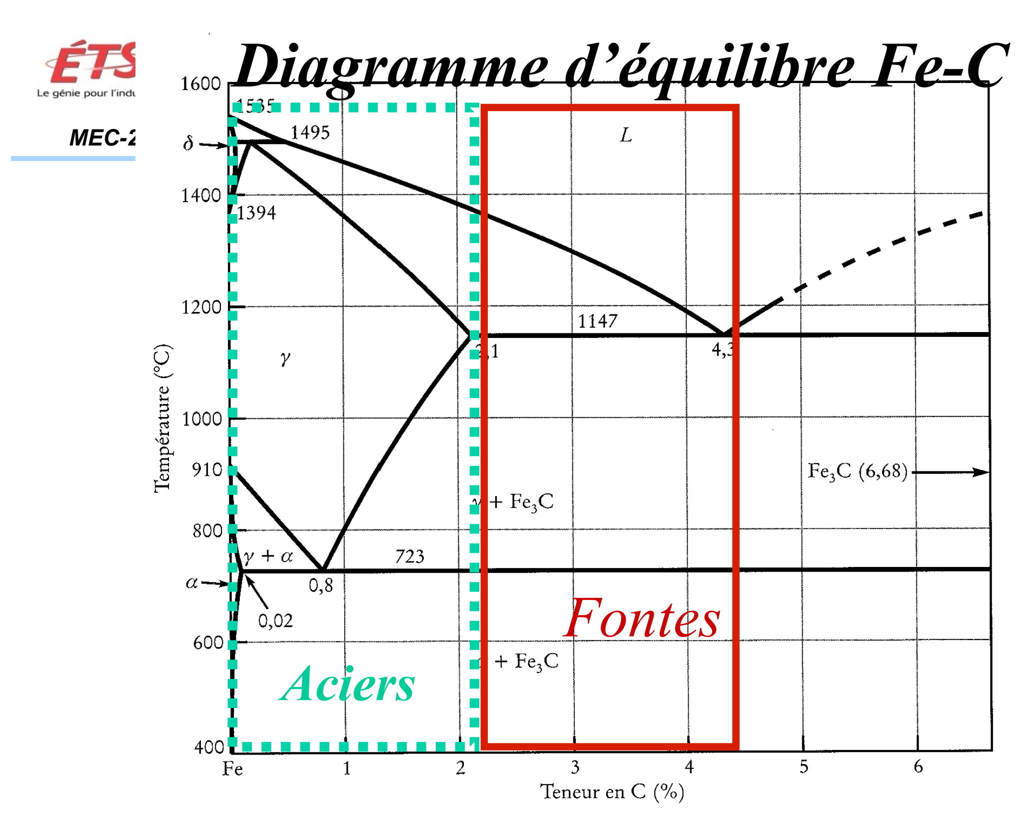
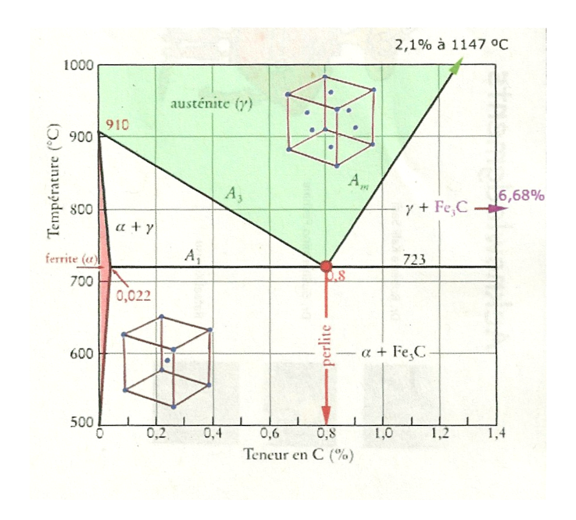
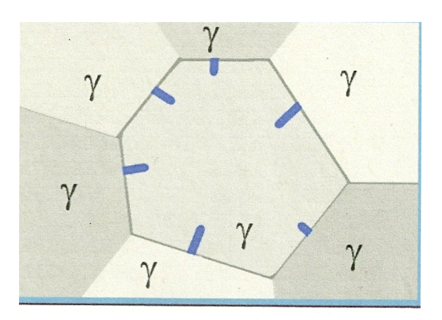


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe–C ; équilibre entre le fer et la cémentite Fe_3C.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

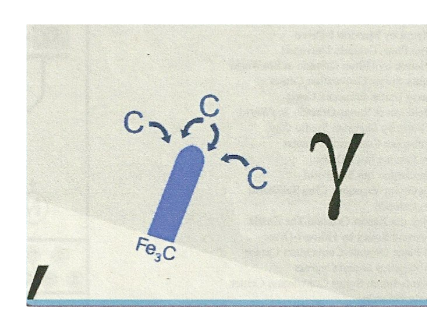


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



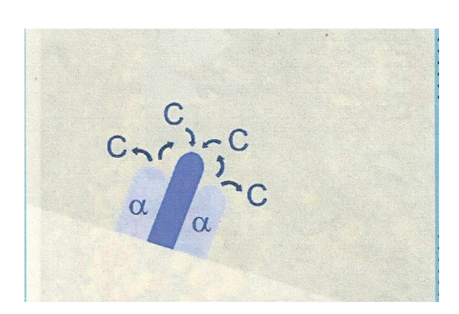
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot





Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

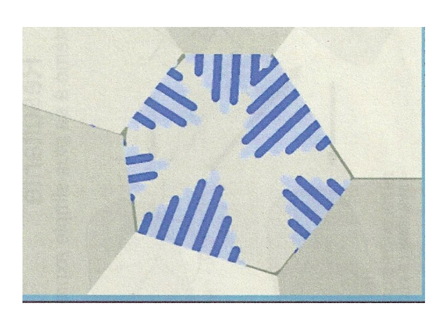




Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Contenu

- Introduction
- Transformation de phases
  - Introduction
  - Cinétique des réactions : vitesse de transformation
  - Transformation isothermes :
    - Formation de la perlite;
    - Formation de la bainite;
    - Formation de la martensite et de la martensite de revenu;
    - Formation de la sphéroïdite.
- Traitement thermique des aciers
  - Traitement thermique dans la masse : trempabilité
  - Traitements de surface
  - Les récuits
  - Transformation en refroidissement continu



Tout prends du temps !!!



Temps, transformation, température

MEC-200

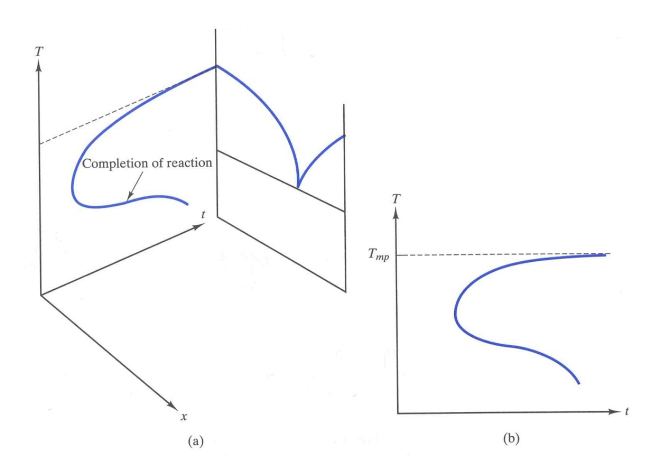


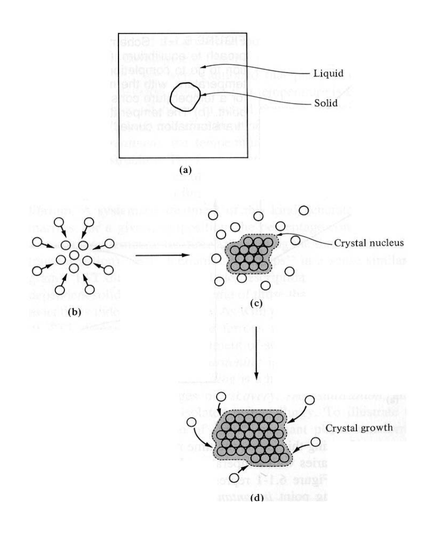
FIGURE 10.1 *Schematic illustration of the approach to equilibrium. (a) The time for solidification to go to completion is a strong function of temperature, with the minimum time occurring for a temperature considerably below the melting point. (b) The temperature–time plane with a transformation curve. We shall see later that the time axis is often plotted on a logarithmic scale.*

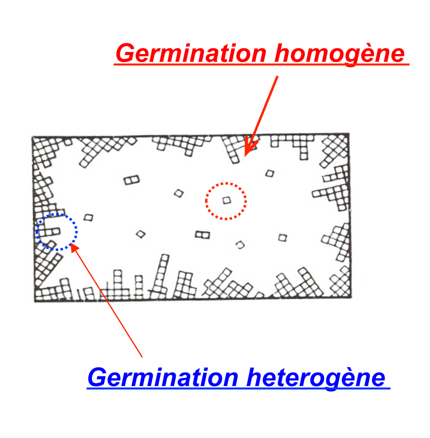
Source: Introduction to Materials Science for Engineers, 7th Edition, J.F. Shackelford



MEC-200

Germination et croissance



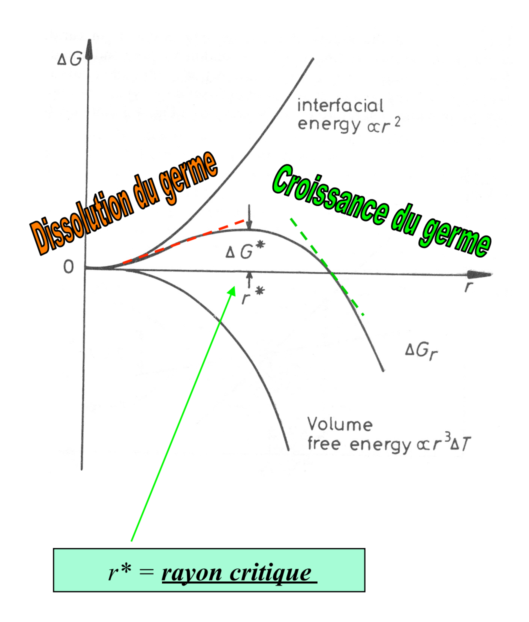


Source: Introduction to Materials Science for Engineers, 7th Edition, J.F. Shackelford



MEC-200

Germination



r* = rayon critique

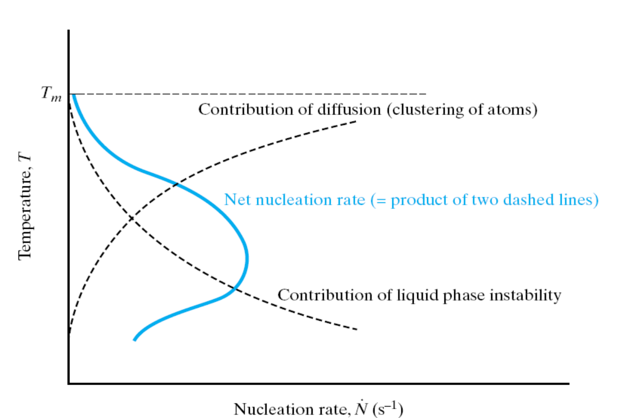


Figure 10-4 *The rate of nucleation is a product of two curves that represent two opposing factors (instability and diffusivity).*

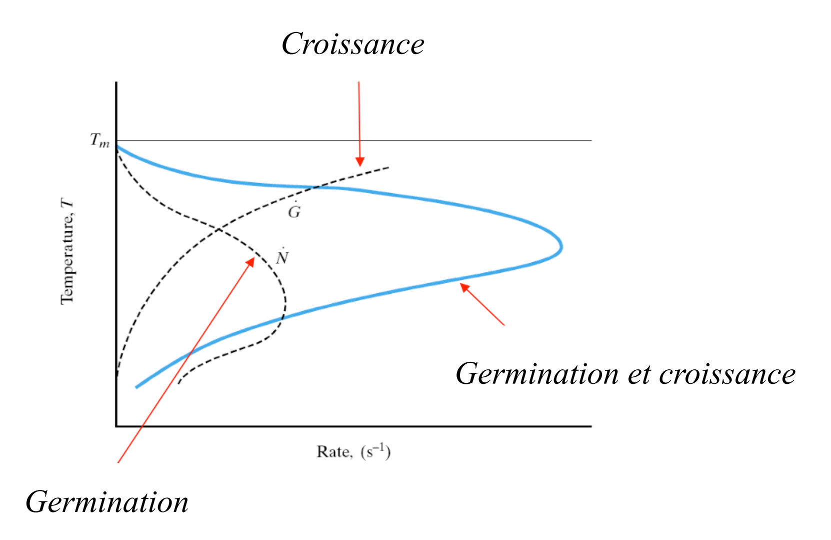
Source: Introduction to Materials Science for Engineers, 7th Edition, J.F. Shackelford



MEC-200

Germination et croissance

Croissance



Germination et croissance

Germination

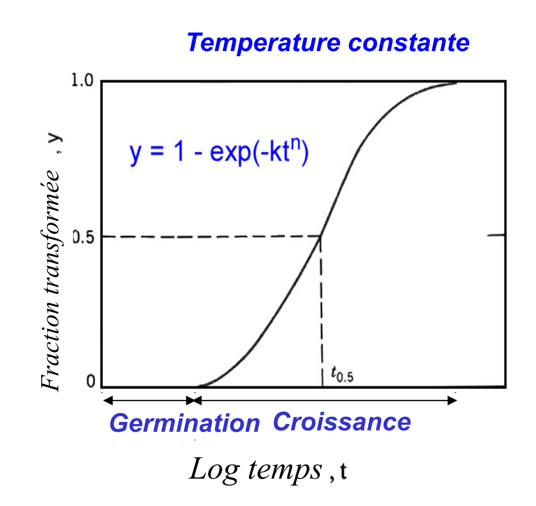
Source: Introduction to Materials Science for Engineers, 7th Edition, J.F. Shackelford



MEC-200

Cinétique de transformation

Temperature constante



Fraction transformée , y

Germination ***Croissance***

Log temps , t

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



MEC-200

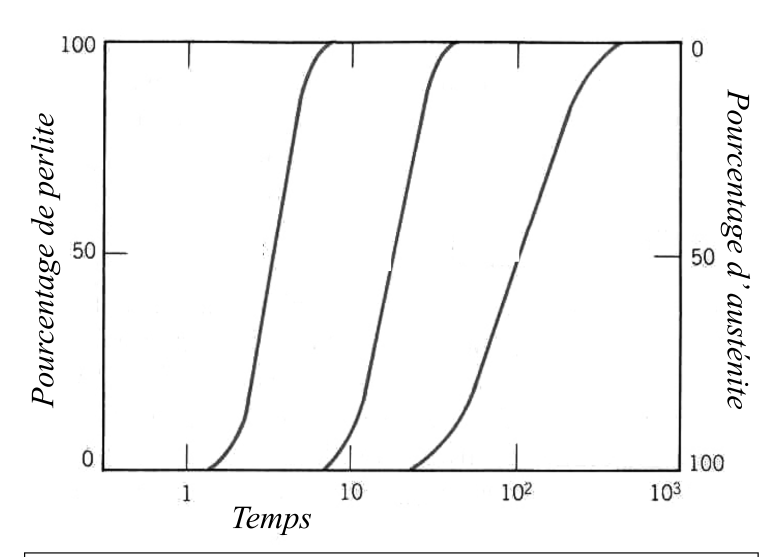
Contenu

- Introduction
- Transformation des phases
  - Introduction
  - Cinétique des réactions : vitesse de transformation
  - Transformation isothermes :
    - Formation de la perlite;
    - Formation de la bainite;
    - Formation de la martensite et de la martensite de revenu;
    - Formation de la sphéroïdite.
- Traitement thermique des aciers
  - Traitement thermique dans la masse : trempabilité
  - Traitements de surface
  - Les récuits
  - Transformation en refroidissement continu



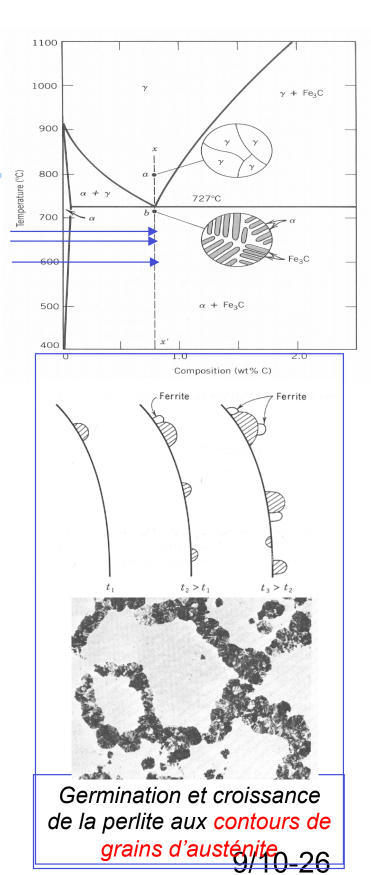
MEC-200

Cinétique de transformation eutectoide



Courbes en S de cinétique de transformation isotherme d'un acier de composition eutectoide (0.76 %). Décomposition de la phase austenite et formation de ferrite + cementite, soit de la perlite.

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



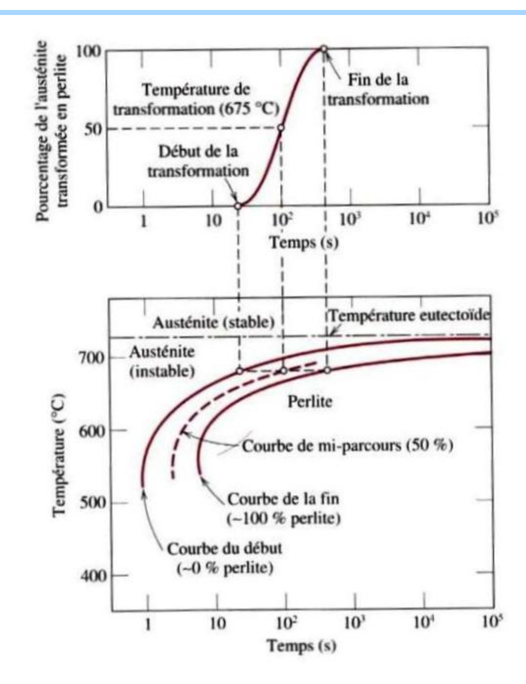
Germination et croissance de la perlite aux contours de grains d'austénite



Cinétique de transformation

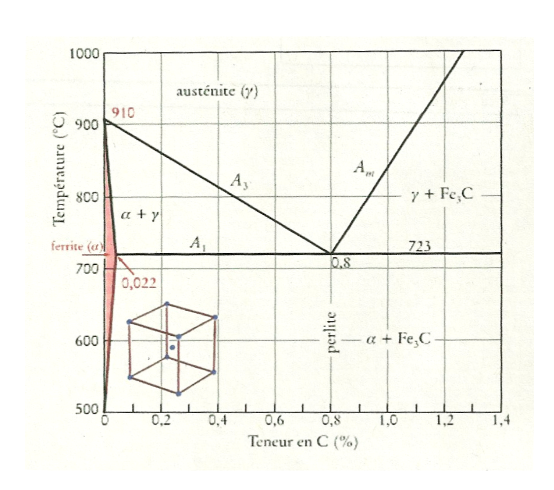
Importance du temps et de la température sur les propriétés finales.

Pour chaque température => tracer l'intervalle de temps de la transformation => diagramme TTT (Temps – température - transformation).



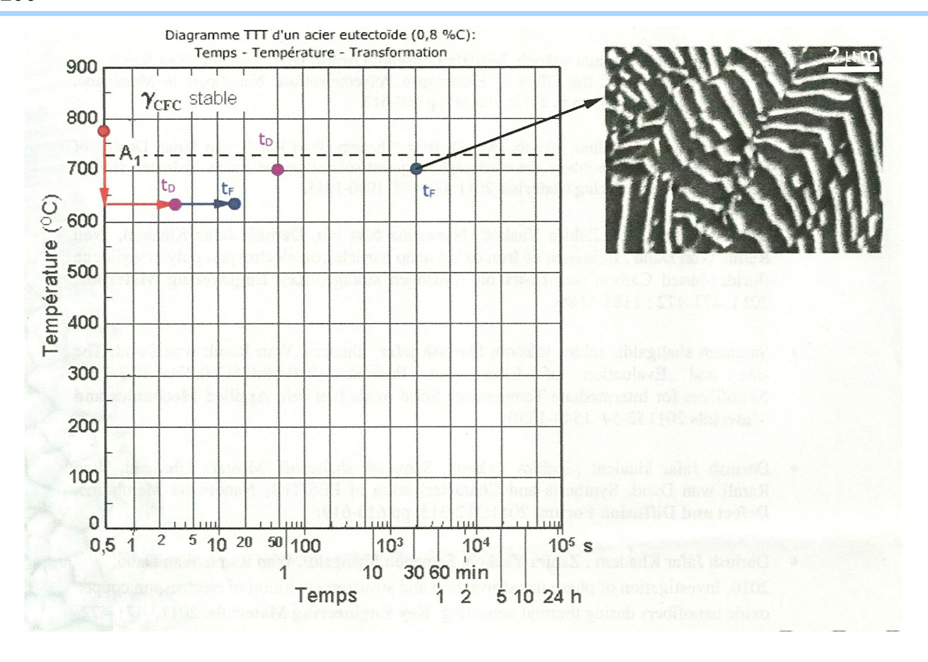
Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister





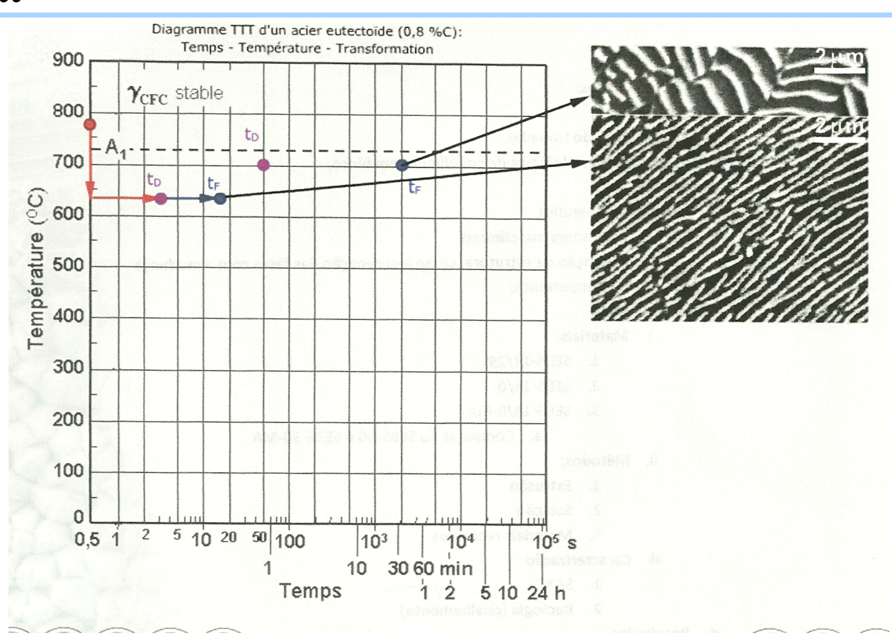
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot





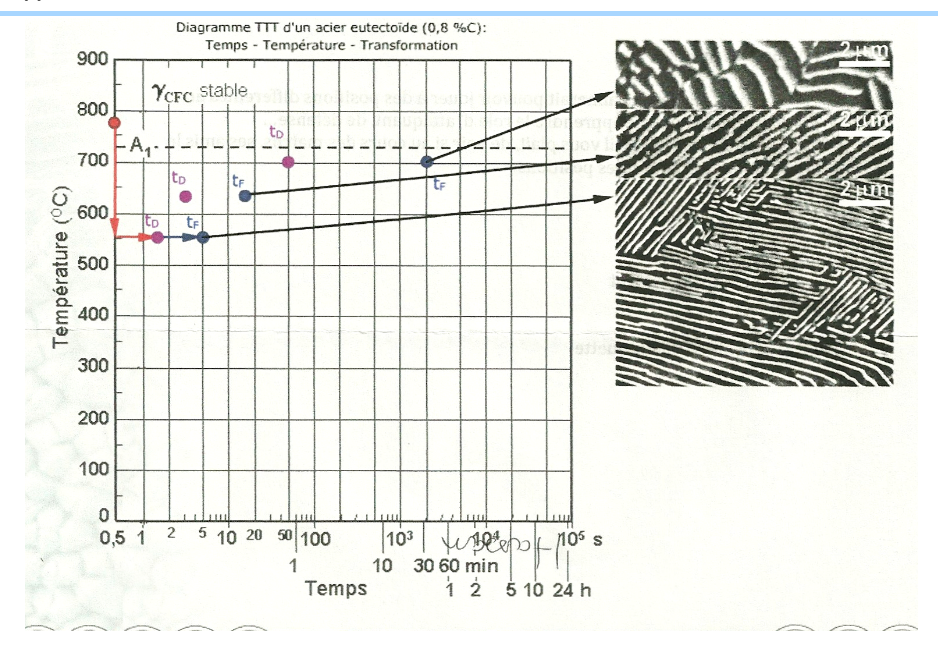
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot





Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot





Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Perlite

A 600°C (droite isotherme)

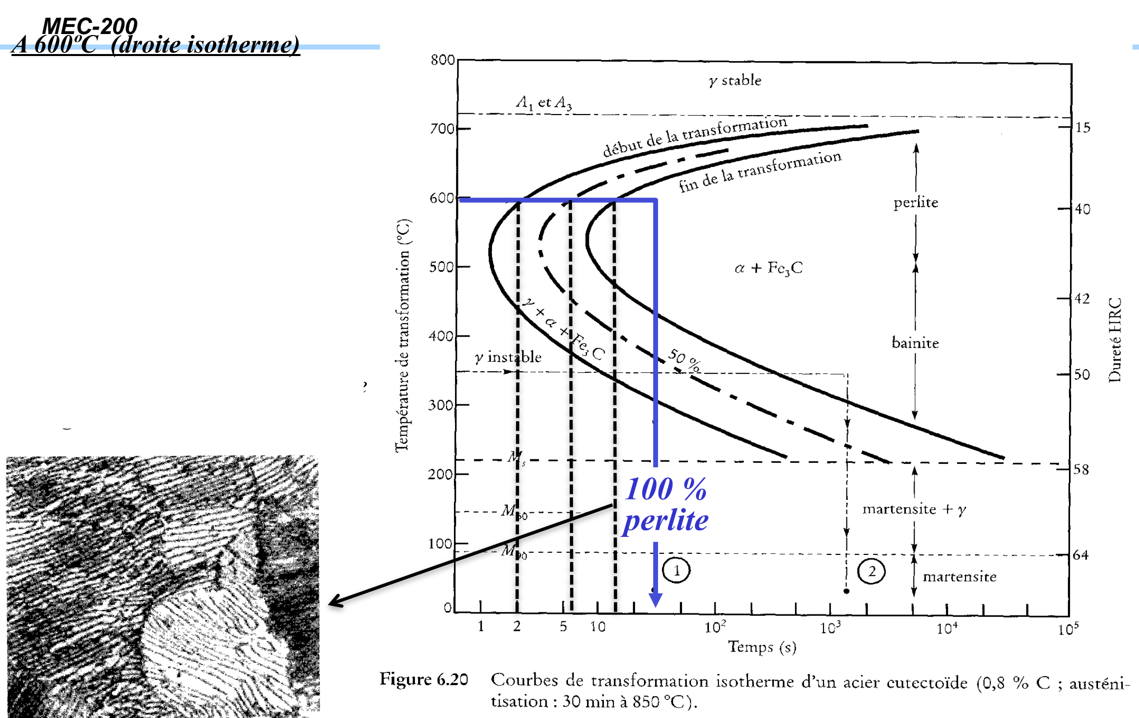
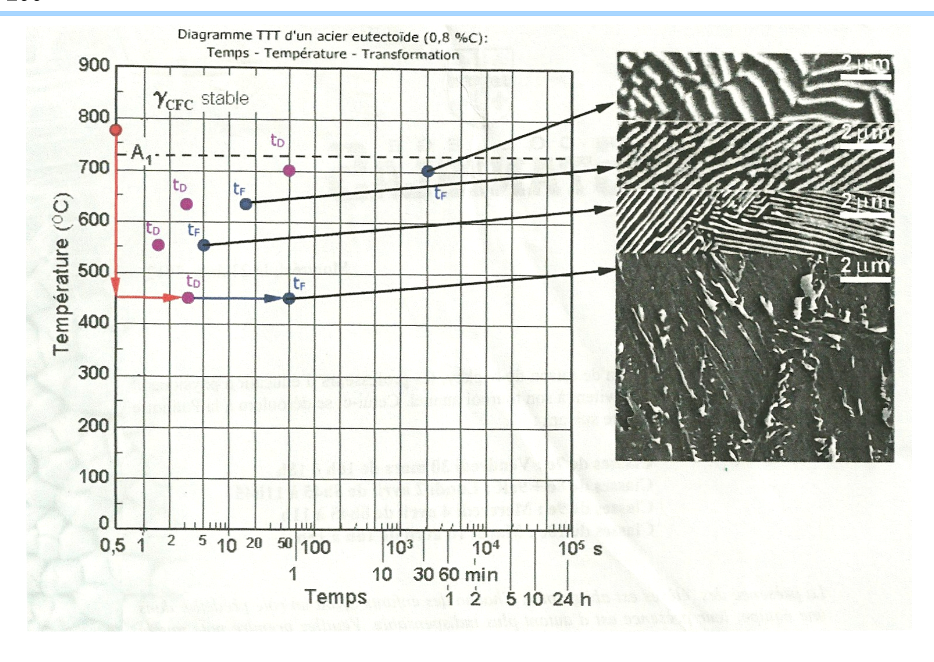


Figure 6.20 Courbes de transformation isotherme d'un acier eutectoïde (0,8 % C ; austénitisation : 30 min à 850 °C).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot





Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Bainite

A 360ºC (droite isotherme)

A t = 10s => début de la transformation

A t = 300 s => 100 % de bainite

Au final

Échantillon => 100 % de bainite (α + Fe_3C) ayant une dureté de 50 HRC

Remarque

Quand T < 500ºC => Fe_3C ne peut plus croitre sous forme de lamelles => fins précipités.

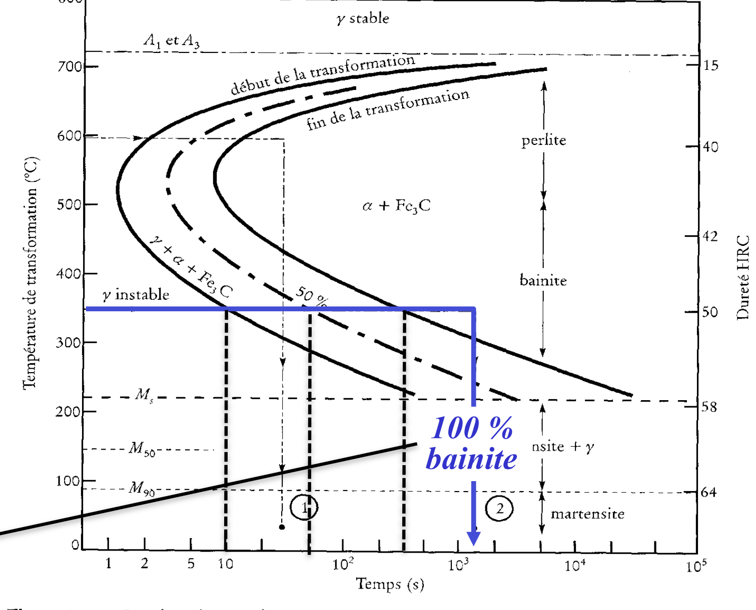
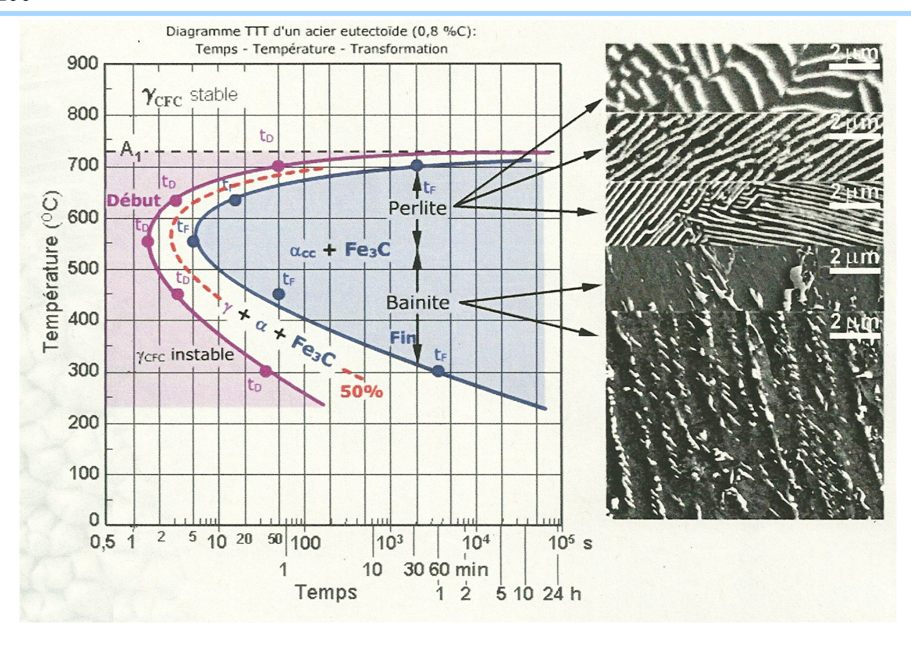


Figure 6.20 Courbes de transformation isotherme d'un acier eutectoïde (0,8 % C ; austénitisation : 30 min à 850 °C).

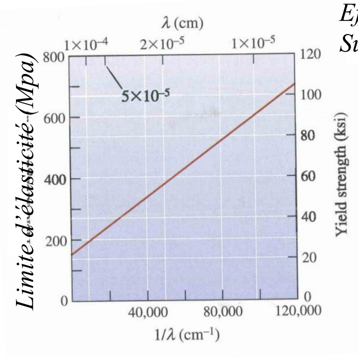
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot





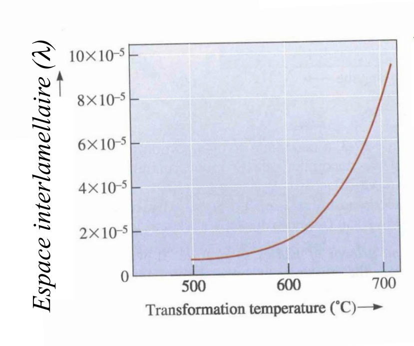
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Influence de la structure de la perlite sur les propriétés





Effet de l' espace interlamellaire
Sur la limite d' élasticité de la perlite



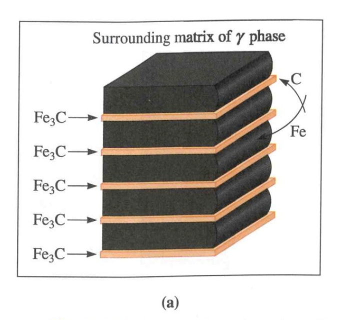
Effet de la température de transformation de l'austénite sur l'espace interlaméllaire de la perlite

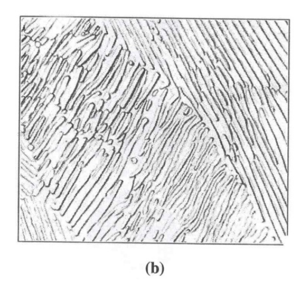
Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Exercice

1. *Concevoir un traitement thermique pour obtenir la structure perlitique montrée ci-dessous.*





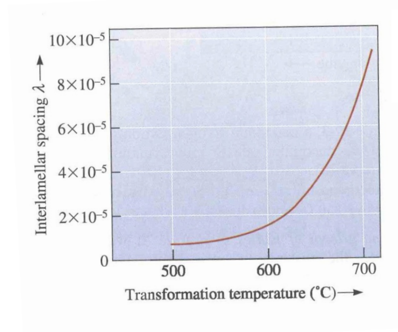
(a) (b)

Figure 12-15 Growth and structure of pearlite: (a) redistribution of carbon and iron, and (b) photomicrograph of the pearlite lamellae (×2000). (*From* ASM Handbook, *Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.*)

Croissance de la perlite (a) redistribution du C et Fe
(b) Micrographie des lamelles de perlite (x 2000)

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay

Exercice



Effet de la température de transformation de l'austénite sur l'espace interlaméllaire de la perlite

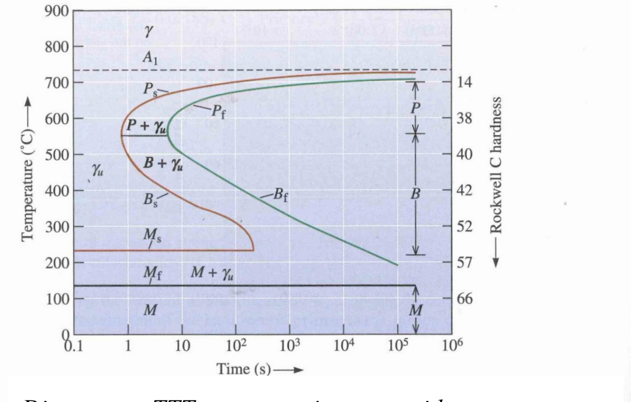
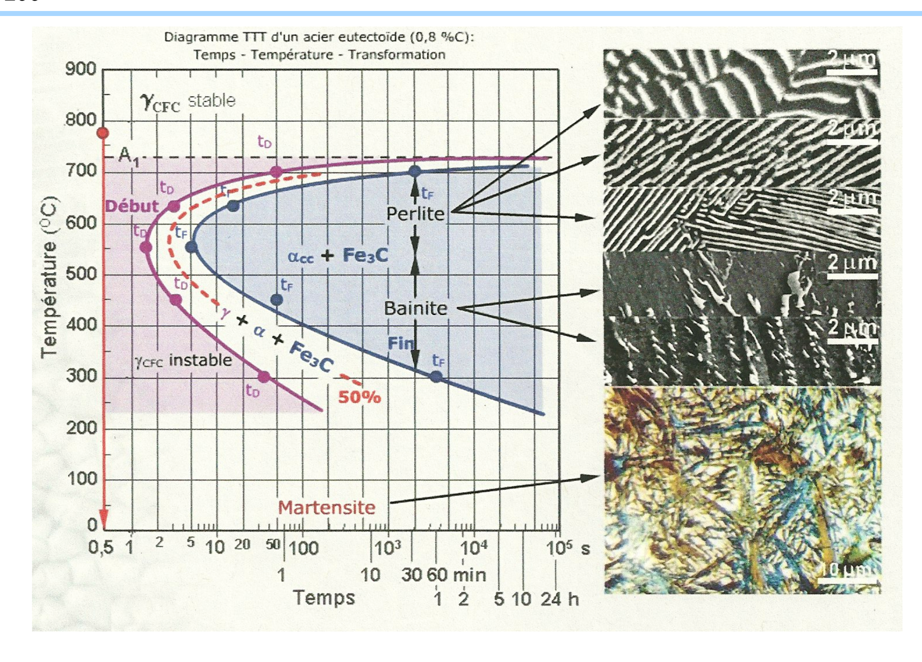


Diagramme TTT pour un acier eutectoide
P: perlite, B: bainite, M:Martensite; s début
De transformation, f: fin de transformation

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay





Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Martensite

A A_3

Refroidissement rapide => transformation de l'austénite en martensite (transformation martensitique).

Au final

Échantillon => 100 % de martensite ayant une dureté de 64HRC.

Remarque

Formation d'aiguilles de martensite (ferrite sursaturé en carbone), se forme si % C > 0.6 %.

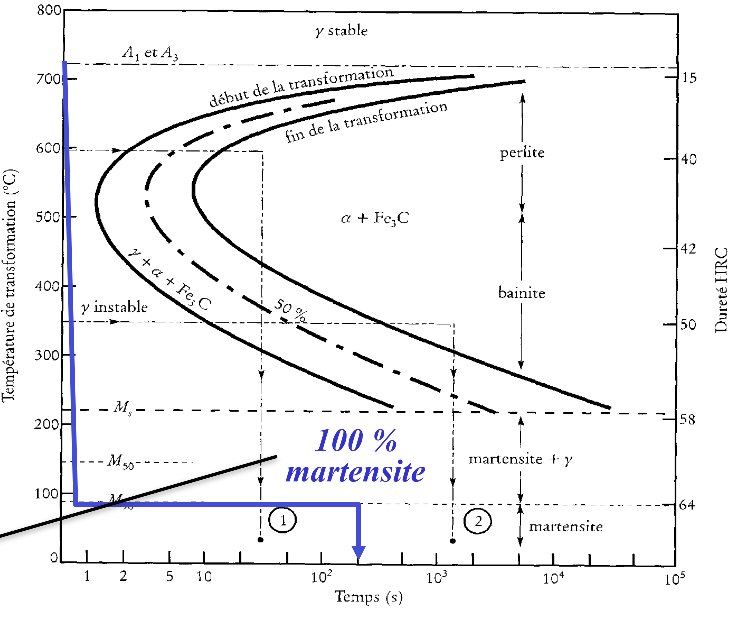


Figure 6.20 Courbes de transformation isotherme d'un acier eutectoïde (0,8 % C ; austénitisation : 30 min à 850 °C).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Martensite en aiguille

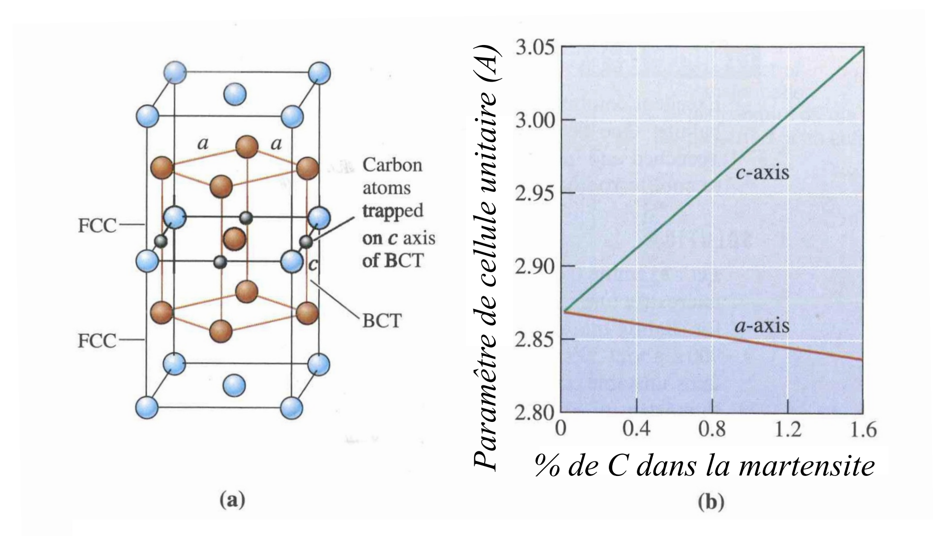


Fig 12.24. (a) Cellule unitaire de martensite (QC) et d'austénite (CFC)
(b) Plus il y a de carbone dans la martensite, la structure tetragonale de la Martensite devient marquée

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Transformation martensitique

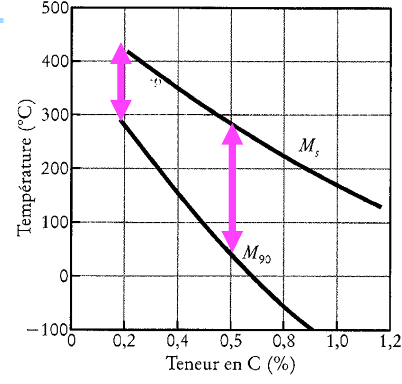
Pourquoi l'apparition de martensite?

Les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser pour former 2 phases α et Fe_3C.

Conséquences

Apparition de contraintes internes

→ Martensite = ferrite sursaturé en C
→ La présence des atomes de C en sites octa
→ Distorsion du réseau



Apparition de contraintes internes qui s'opposent à la poursuite de la transformation

→ Changement de structure cristalline (CFC => quadratique centrée), changement de positions des atomes (inférieure à la distance interatomique) par mouvement coopératif (tous les atomes bougent les uns après les autres).
→ Changement de volume (martensite 4 % plus volumineux que austénite).

Caractéristiques

Phase très dure mais également très fragile (faible ductilité) => intérêt d'obtention de martensite revenue.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Influence de la teneur de carbone sur la dureté de la martensite

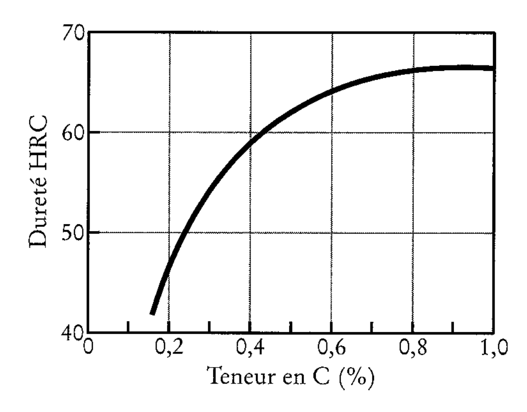


Figure 6.23 Variation de la dureté de la martensite brute de trempe en fonction de la teneur en carbone de l'acier.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Influence de la température de transformation sur les propriétes

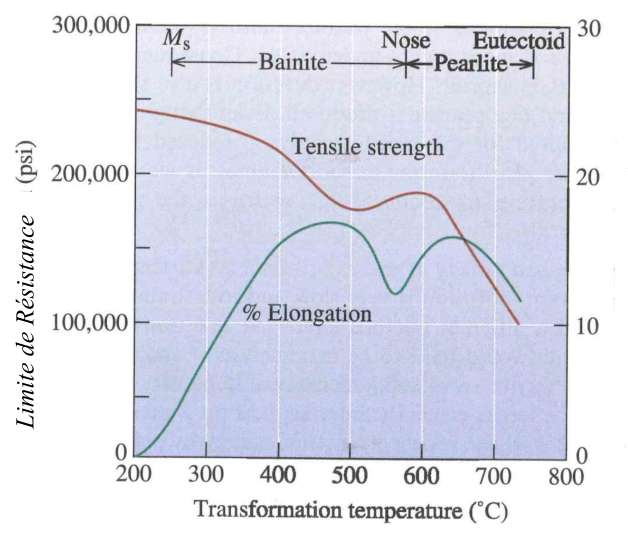


Figure 12-23

Effet de la température de transformation sur les propriétés d'un acier eutectoide

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay

Influence de la température de trempe sur les propriétes d'un acier eutectoide

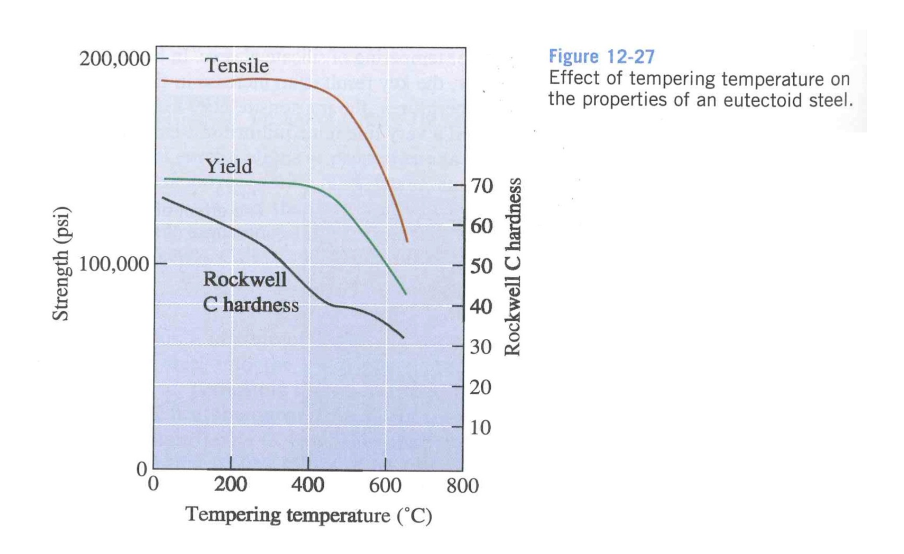
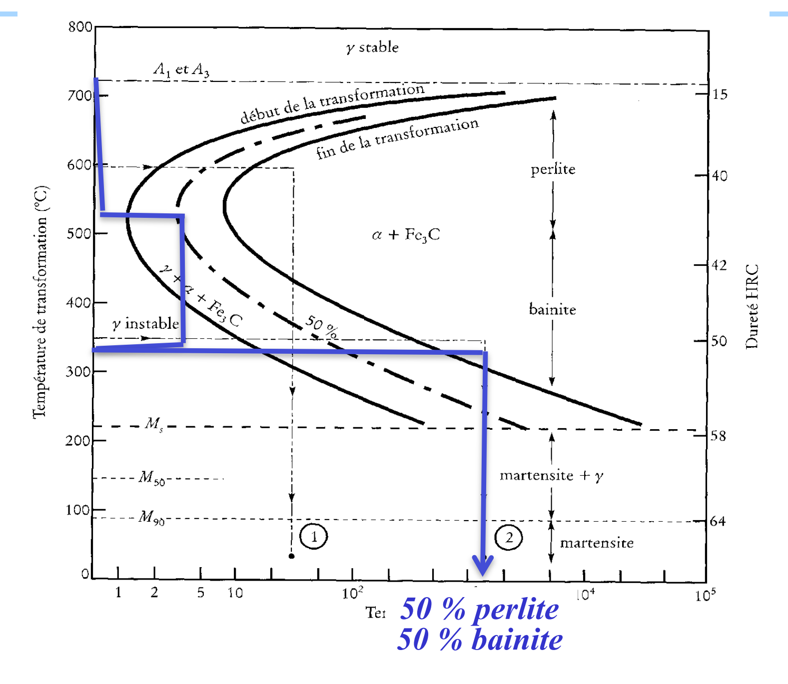


Figure 12-27
Effect of tempering temperature on the properties of an eutectoid steel.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



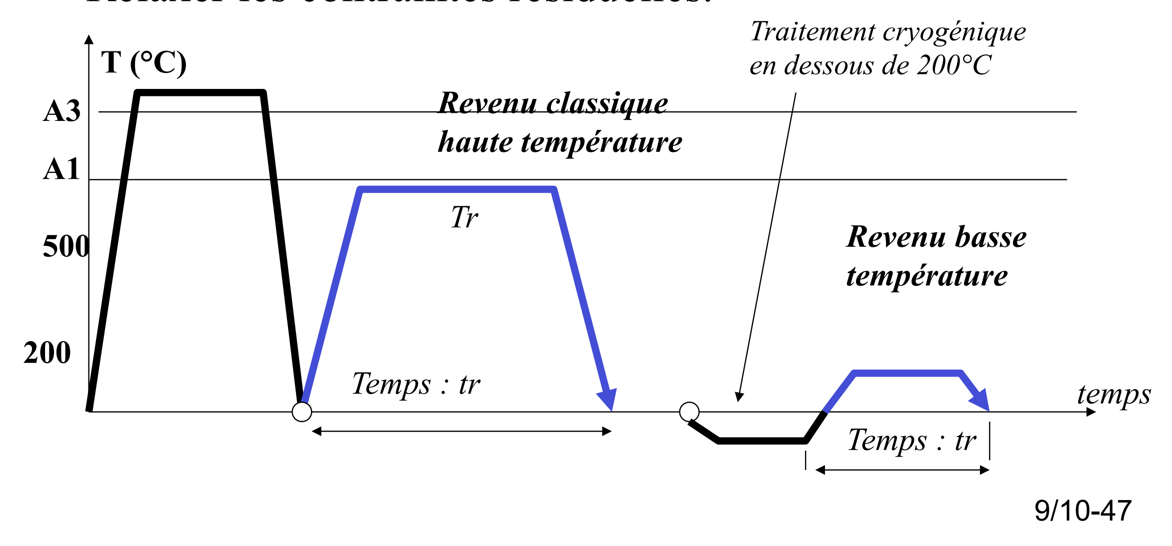


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Revenu après une trempe

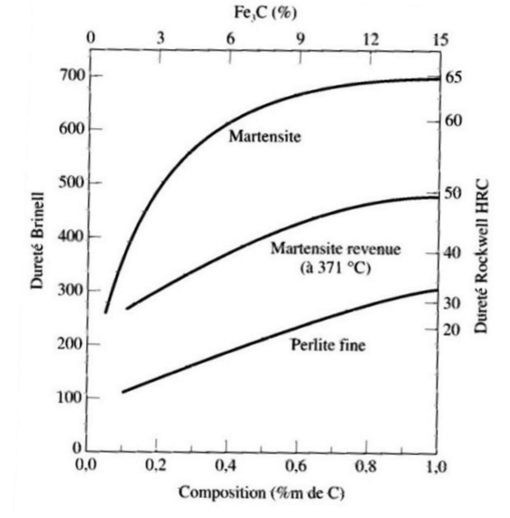
- Améliorer la ténacité et la formabilité du matériau trempé.
- Baisser Rm, Re et la dureté.
- Relaxer les contraintes résiduelles.





Martensite revenue

Principe :
La martensite étant une phase métastable
=> tendance à se décomposer pour reformer α et Fe_3C.
Cette décomposition est accentuée par la température (plus T est grande et plus elle sera rapide) => revenu.
Conséquences :
Diminution de la dureté, R_m et R_e,
Augmentation de la ductilité,
Relaxe les contraintes résiduelles.

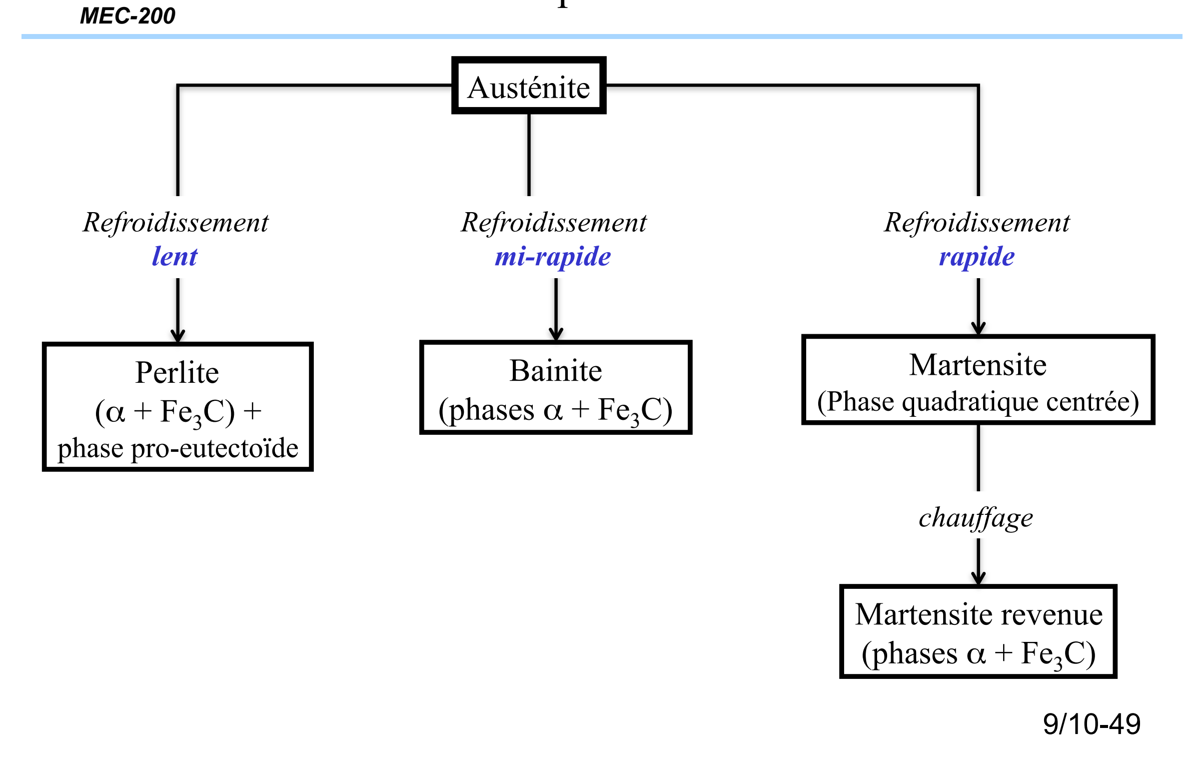


Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

Résumé de la transformations de phase des aciers de composition eutectoide

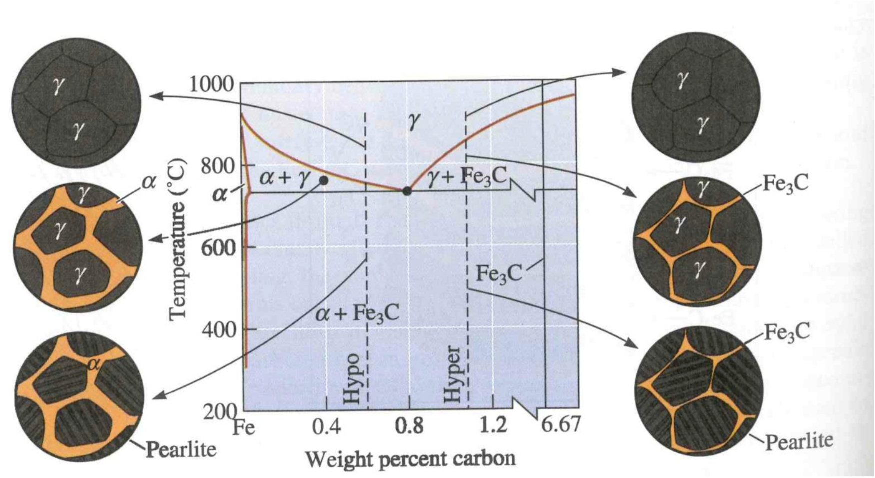




MEC-200

Paramètres contrôlant la transformation eutectoide

- La perlite se forme pour les aciers hypoeutectoide et pour les aciers hypereutectoide.



Evolution de la microstructure des aciers hypo et hypereutectoide

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



MEC-200

Paramètres contrôlant la transformation eutectoide

- La perlite se forme pour les aciers hypoeutectoide et pour les aciers hypereutectoide.

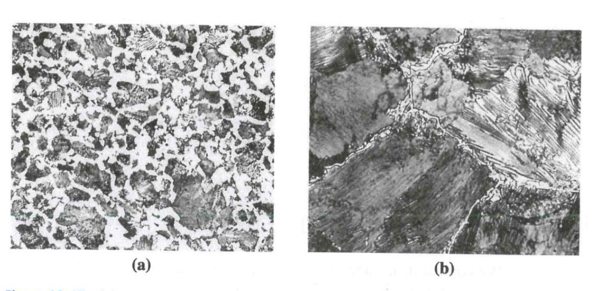


Figure 12-17 (a) A hypoeutectoid steel showing primary α (white) and pearlite (×400). (b) A hypereutectoid steel showing primary Fe_3C surrounding pearlite (×800). (*From* ASM Handbook, *Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.*)

(a) Acier hypoeutectoide montrant de la perlite primaire (blanche) (x400)
(b) Acier hypereutectoide montrant de la cementite entourant de la perlite (x800)

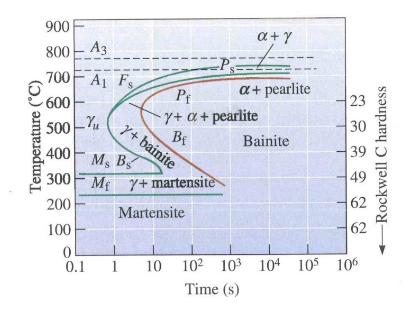
Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay

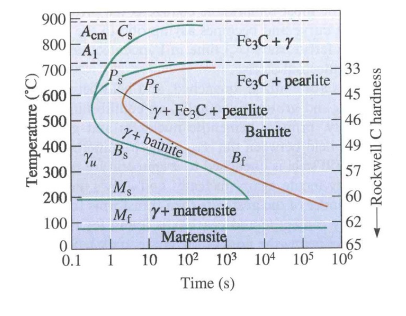


MEC-200

Paramètres contrôlant la transformation eutectoide

- La perlite se forme aussi pour les aciers hypoeutectoide et pour les aciers hypereutectoide.





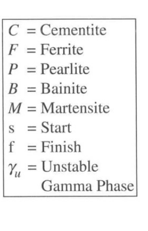


Figure 13-7 The TTT diagrams for (a) a 1050 and (b) a 10110 steel. Note the caption in Figure 13-6 and γ_u = unstable austenite.

Diagramme TTT pour un acier 1050 (a) et 10110

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



MEC-200

Paramètres contrôlant la transformation eutectoide

- Plus on a de carbone, plus on a de Fe_3C et de perlite, et plus l'acier est résistant. Si C % continue d'augmenter, les propriétés diminuent.

TABLE 12-1 *Effet de la concentration de C sur les propriétés mécaniques*

	Refroidissement lent (perlite grossière)			*Refroidissement rapide (perlite fine)*		
Carbon %	*Limite elasticité* (psi)	*Limite De résistance* (psi)	*Allongement* Elongation	*Limite elasticité* (psi)	*Limite De résistance* (psi)	*Allongement* Elongation
0.20	42,750	57,200	36.5	50,250	64,000	36.0
0.40	51,250	75,250	30.0	54,250	85,500	28.0
0.60	54,000	90,750	23.0	61,000	112,500	18.0
0.80	54,500	89,250	25.0	76,000	146,500	11.0
0.95	55,000	95,250	13.0	72,500	147,000	9.5

After Metals Progress Materials and Processing Databook, *1981*.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



MEC-200

Paramètres contrôlant la transformation eutectoide

- Plus on a de carbone, plus on a de Fe_3C et de perlite, et plus l'acier est résistant. Si C % continue d'augmenter, les propriétés diminuent.
- La taille des grains d'austénite obtenue lors de l'austénisation
- La vitesse de refroidissement
- La température de refroidissement
- Attention : jusqu'à maintenant nous avions des traitements thermiques isothermes.
  - À 0.8 % de C, on chauffe pour obtenir l'austénite puis on refroidit et
    - Hautes températures : perlite
    - Moyennes températures : bainite
    - Basses températures : martensite.
  - Que se passe t-il si nous faisons un refroidissement continu?



Exercice

MEC-200

1. *De très bonnes conditions de dureté, résistance et tenacité sont obtenues avec de la bainite. Un acier de composition eutectoide a été austenitisé à 100 % à 750ºC. Ensuite, il a été trempé à 250ºC pour 15 minutes et refroidi jusqu'à la température ambiante.*
   Quelle fut la structure obtenue?

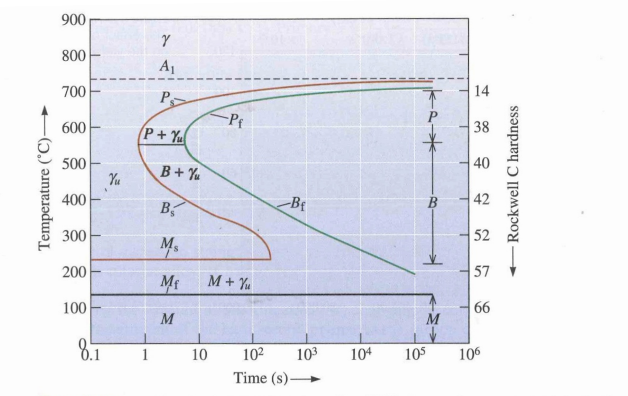


Figure 12-20 The time-temperature-transformation (TTT) diagram for an eutectoid steel, where P = Pearlite, B = Bainite, and M = Martensite. The subscripts "s" and "f" indicate the start and finish of a transformation.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Exercice

MEC-200

<u>EXERCICE 6-7</u>

En considérant le diagramme TTT de l'acier 3140, répondez à ces questions, où **T** = température de trempe (en °C) et **t** = temps de transformation à cette température.

a) Quelle est la température minimale d'austénitisation ?

b) T = 700 / t = 3s. Quelles sont les phases en présence ?

c) T = 700 / t = 20 s. Quelles sont les phases en présence ?

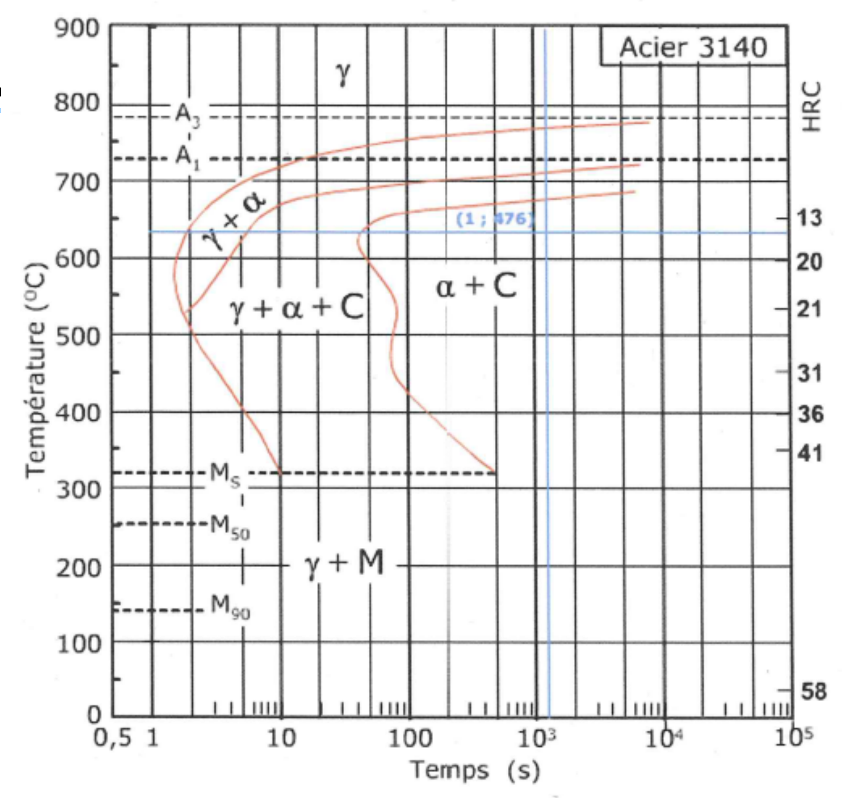
d) T = 650 / t = 100s. Quels sont les constituants en présence?
   Quelle est la dureté ?

e) T = 450 / t = 20s puis trempe à l'eau à 20 °C.
   Quels sont les constituants en présence?

f) Trempe à l'eau à 20 °C. Quels sont les constituants en présence?
   Quelle est la dureté ?

Des Matériaux, J.P. Baillon, J.M. Dorlot





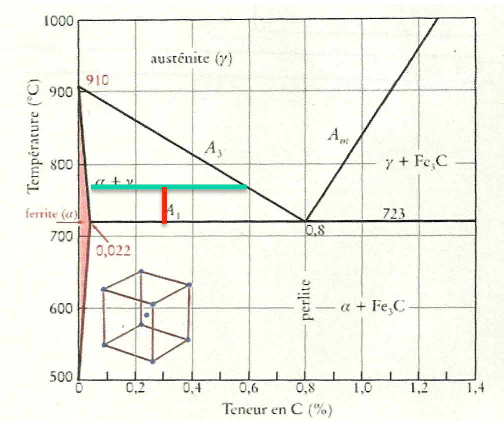
Des Matériaux, J.P. Baillon, J.M. Dorlot



Exercice

1. *Un acier qui possède une microstructure contenant 50 % de ferrite et 50 % de martensite, possède une bonne combination de propriétés. La martensite lui confère une certaine résistance alors que la ferrite lui confère ductilité et ténacité.*

   Concevoir un traitement thermique qui produise cette microstructure dans laquelle la phase martensitique contient 0.60 % de Carbone.



Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Formation de sphéroidite

MEC-200

Les aciers qui contiennent une grande quantité de Fe_3C sont difficiles à usiner.
Il est possible de modifier la morphologie de Fe_3C en formant de la sphéroidite.
Au cours de cette transformation, qui requiert plusieurs heures à 30°C en dessous de A_1, la cémentite se transforme en sphères.
La microstructure est alors une matrice de ferrite avec du Fe_3C. On usine et puis, ensuite, on refait un traitement thermique pour avoir des les propriétés mécaniques requises.

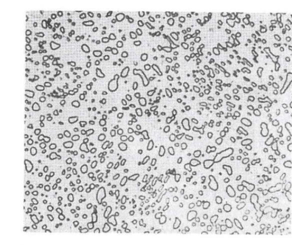


Figure 13-5
The microstructure of spheroidite, with Fe_3C particles dispersed in a ferrite matrix (×850). (From ASM Handbook, Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

On peut obtenir cette microstructure si la martensite est recuite en dessous de A1.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Contenu

MEC-200



Trempabilité d'un acier

MEC-200

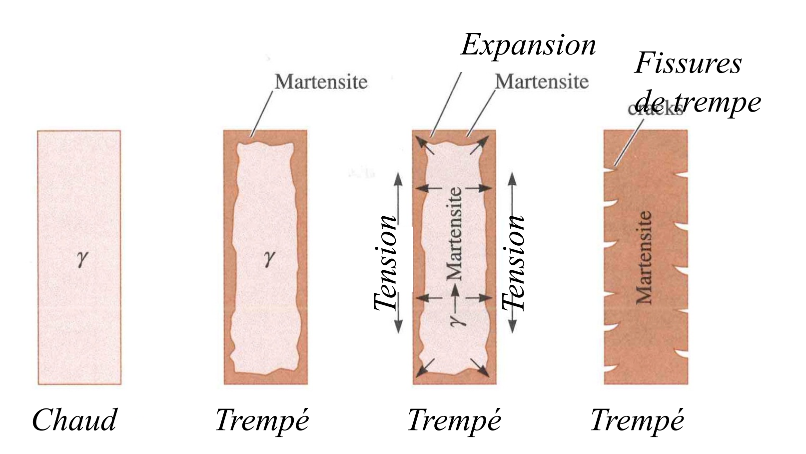
- *Capacité d'un acier donné à se transformer en martensite dans des conditions de refroidissement données.*

- *Attention ne pas confondre dureté et trempabilité.*



Trempabilité d'un acier

MEC-200



Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



MEC-200

Trempabilité d'un acier

- *Capacité d'un acier donné à se transformer en martensite dans des conditions de refroidissement données.*

- *Attention ne pas confondre dureté et trempabilité.*

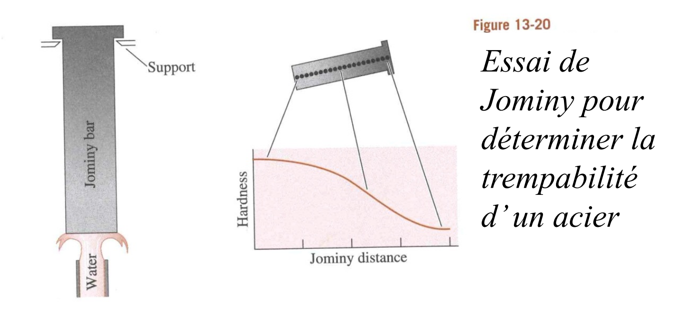
- *Mesurée par la diminution de la dureté en fonction de l'augmentation de la distance sous la surface et donc d'une teneur en martensite faible.*

- *Évaluée par l'essai Jominy.*



MEC-200

Essai Jominy



Essai de Jominy pour déterminer la trempabilité d'un acier

Échantillon de 4 pouces et 1 pouce diamètre

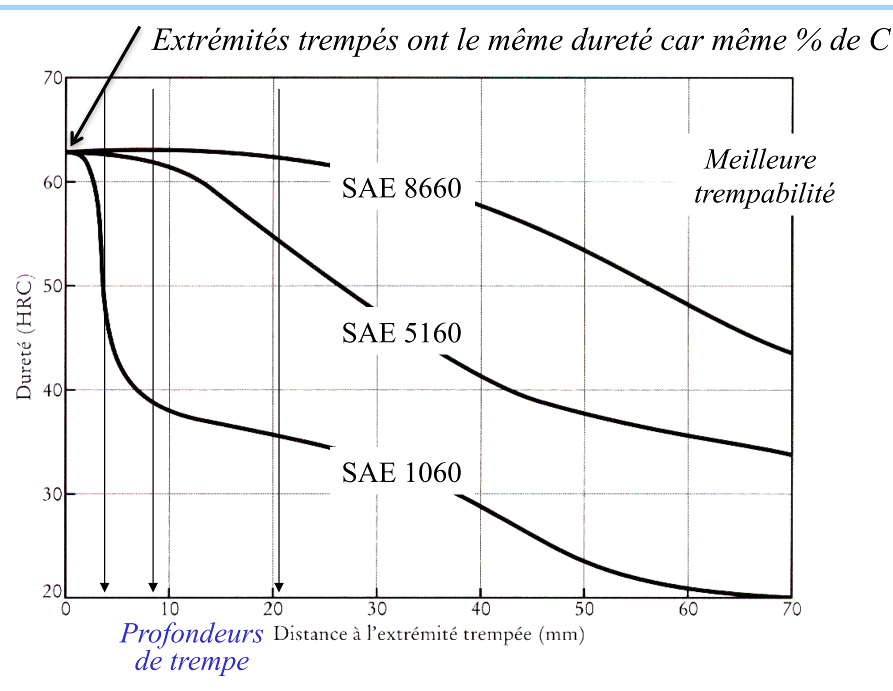
Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Courbes de trempabilité Jominy

MEC-200

Extrémités trempés ont le même dureté car même % de C



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Exercice

MEC-200

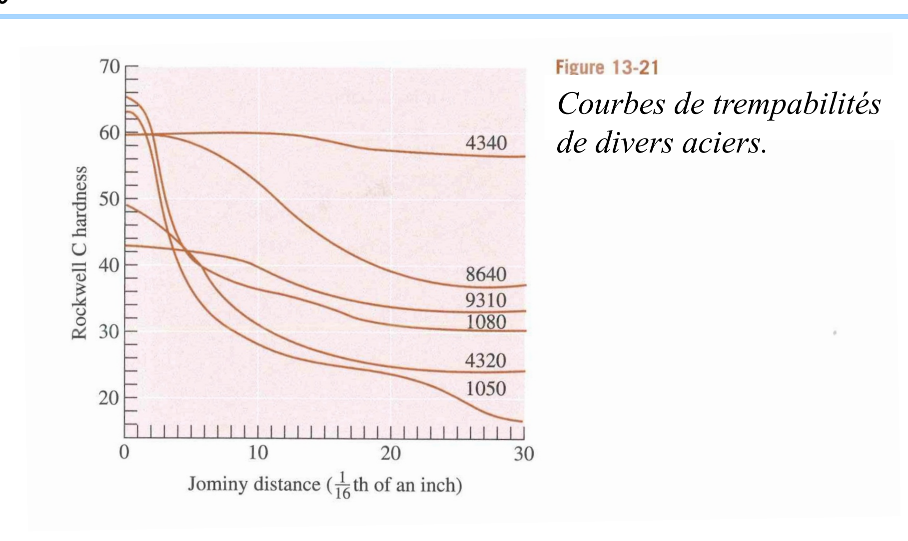


Figure 13-21

Courbes de trempabilités de divers aciers.

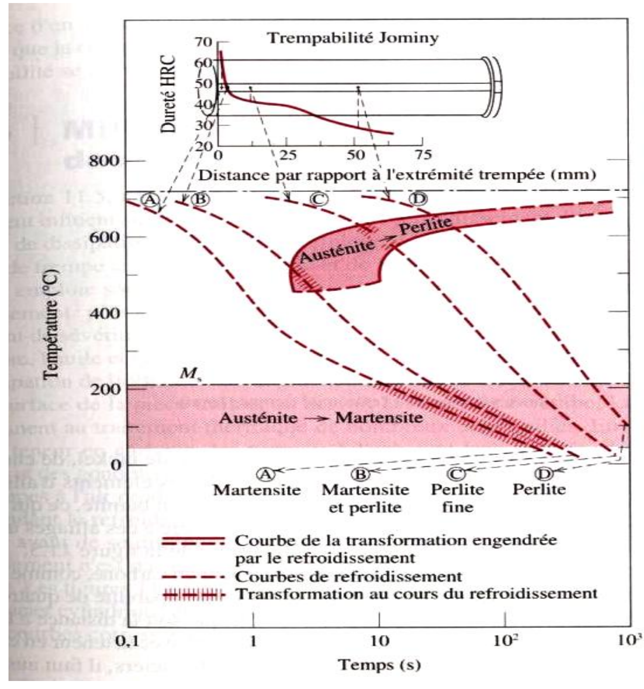
On utilise l'acier 9310 pour une pièce d'embrayage. Il a une dureté de HRC 40 à une certaine distance et on constate qu'il s'use trop et on voudrait une dureté de HRC 50. Quels sont les aciers qui sont utilisables?

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Essai Jominy

MEC-200



Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



Milieux de trempe

MEC-200

Par ordre de sévérité décroissante :

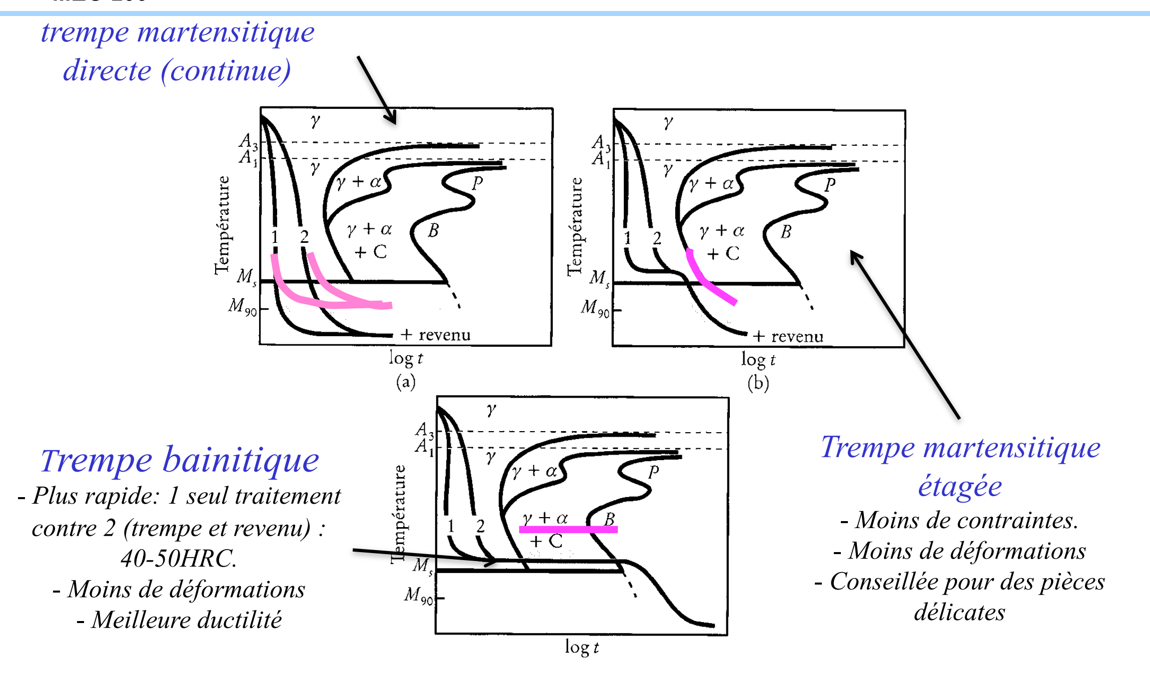
- *Solutions d'eau et de sel,*
- *L'eau,*
- *Huiles,*
- *Brouillards (air contenant des gouttelettes d'eau),*
- *Bains fluidisés (courant gazeux contenant des particules en suspension),*
- *L'air et les gaz.*

Choisir le bain qui donne les résultats escomptés tout en étant le moins sévère possible, pour éviter des fissures, ruptures suites aux gradients de température très élevé (augmentation des contraintes internes).



MEC-200

Schéma de 3 types de traitement



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



MEC-200

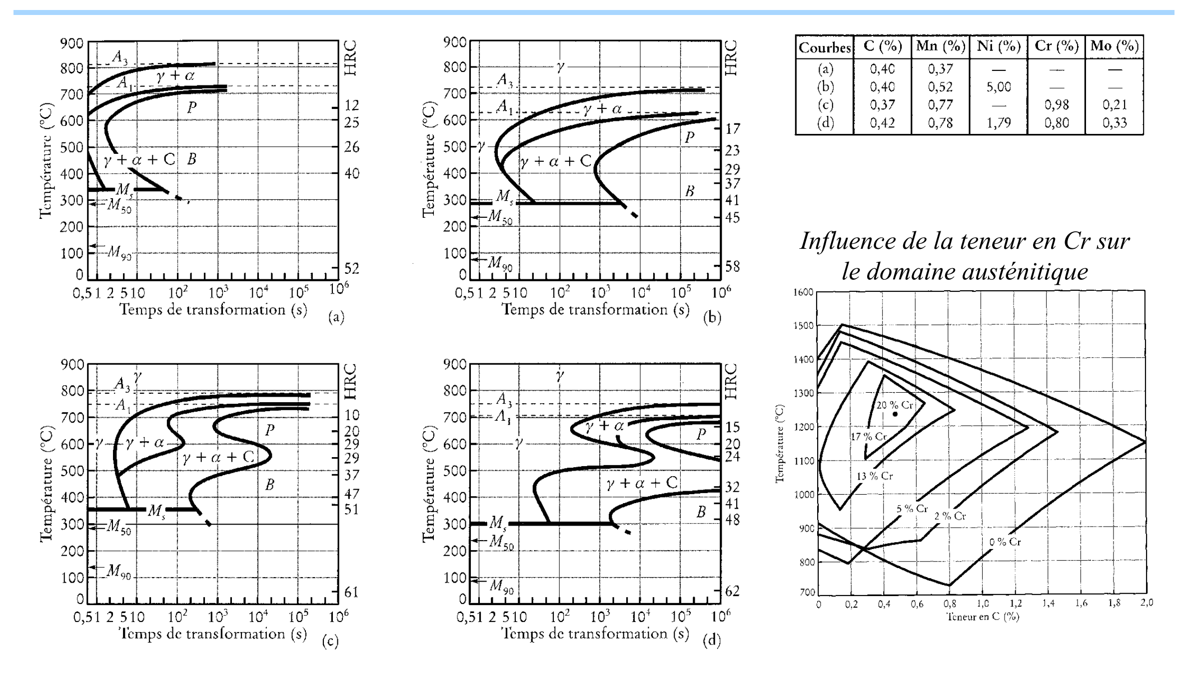
Influence des éléments d'alliages sur le trempage

- La composition chimique des aciers permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés recherchées.
- La trempabilité des aciers au carbone est faible. En général, il est impossible d'obtenir une trempe à cœur lorsque la plus petite dimension des pièces excède une quinzaine de mm.
- Les éléments d'alliage peuvent améliorer la trempabilité.
- Les éléments d'addition retardent le début des transformation perlitique et bainitique et diminuent donc la vitesse critique de trempe.



Influence des éléments d'alliages sur le trempage

MEC-200



Courbes	C (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
(a)	0,40	0,37	—	—	—
(b)	0,40	0,52	5,00	—	—
(c)	0,37	0,77	—	0,98	0,21
(d)	0,42	0,78	1,79	0,80	0,33

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Carbone équivalent

MEC-200

$$C_{éq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

- *Plus $C_{éq}$ est élevé,*
  - *Plus l'acier est trempable,*
  - *Moins l'acier est soudable.*

- *Plus le pourcentage de carbone est élevé, plus l'acier est trempable.*

- *Les aciers alliés (Ni-Cr-Mo) suivants sont classés par ordre de trempabilité croissante : 8620, 8630, 8640 et 8660.*

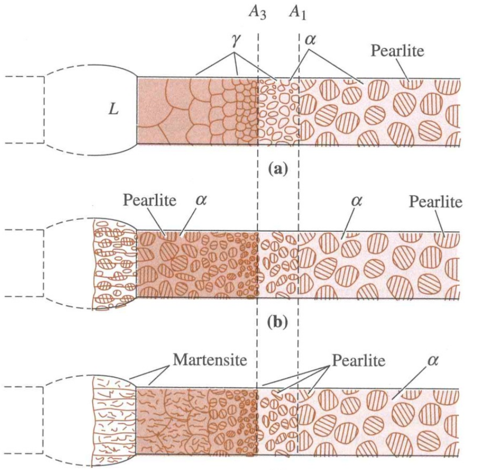


Carbone équivalent et soudabilité

MEC-200

$$C_{éq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

- *Plus $C_{éq}$ est élevé , moins l'acier est soudable.*



Développement de la microstructure de la zone chauffée au cours du soudage (a) Structure à température maximale, (b) structure après refroidissement pour un acier faiblement trempant, (c) structure après refroidissement pour un acier fortement trempant

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Carbone équivalent et soudabilité

MEC-200

$$C_{éq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

- *Plus $C_{éq}$ est élevé , moins l'acier est soudable.*

- *$C_{éq}$ < 0.45 % moins de risque de fissure dans la zone soudée et aucun traitement thermique n'est nécessaire pour prévenir les fissures dans la ZAT.*
- *0.45 % < $C_{éq}$ < 0.6 % propice aux fissures. Traitement thermique nécessaire après le soudage.*
- *$C_{éq}$ > 0.6 % risque élevé de fissuration. Pre-chauffage et traitement thermique nécessaires.*



Contenu

- Introduction
- Transformation des phases
  - Introduction
  - Cinétique des réactions : vitesse de transformation
  - Transformation isothermes :
    - Formation de la perlite;
    - Formation de la bainite;
    - Formation de la martensite et de la martensite de revenu;
    - Formation de la sphéroïdite.
- Traitement thermique des aciers
  - Traitement thermique dans la masse : trempabilité
  - Traitements de surface
  - Les récuits
  - Transformation en refroidissement continu



Traitements de surface

- Traitements thermiques améliorent R_e et R_m mais diminuent la tenacité.
- Arbres de torsion, dents d'engrenage.
- Besoin de dureté superficielle et de ténacité.
- Pas besoin de bonne trempabilité.
- Idéal pour aciers qui n'ont pas beaucoup d'éléments d'addition.
- Les surfaces sont sièges d'importantes contraintes de compression résiduelles. Bénéfiques pour résistance à la fatigue et endurance, car les microfissures auront plus de difficulté à se propager.
- Deux types : trempes superficielles et traitements thermochimiques.



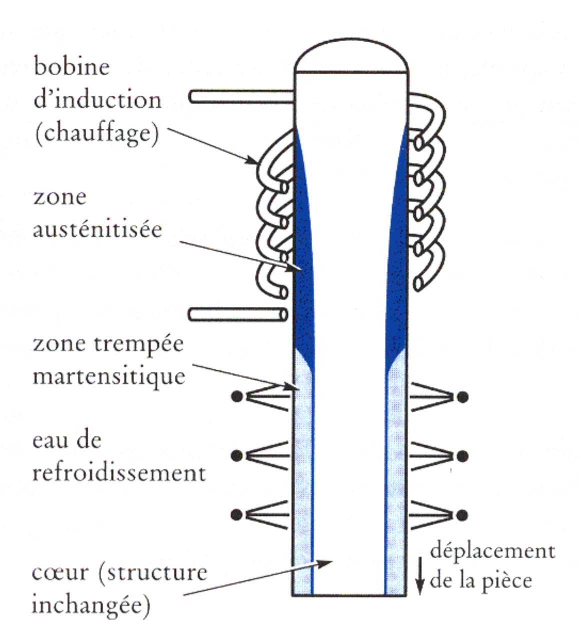
Trempe superficielle

- On austénize la pièce.
- On la trempe.
  - Épaisseur trempée inférieure à 1 mm.
- On revient.
- Aciers ordinaires % C : 0.30 à 0.50 %.

- Chalumeau (formes irrégulières engrenages et pièces en petite série).
- Induction d' un courante à haute fréquence.



Trempe superficielle



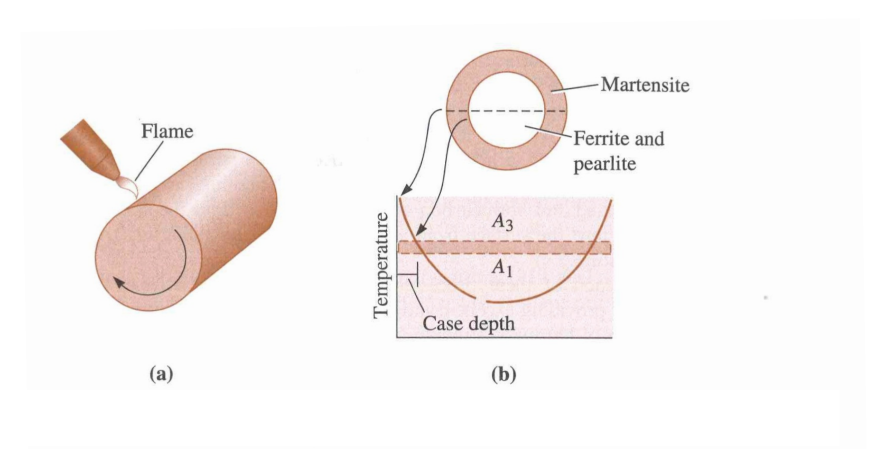
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Figure 10.6 Trempe superficielle par induction au défilé.



MEC-200

Trempe superficielle



Traitement de surface. (b) seule la surface est chauffée à
Une température au dessus de A_1 et devient ensuite martensite

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



MEC-200

Trempe par induction d'un engrenage

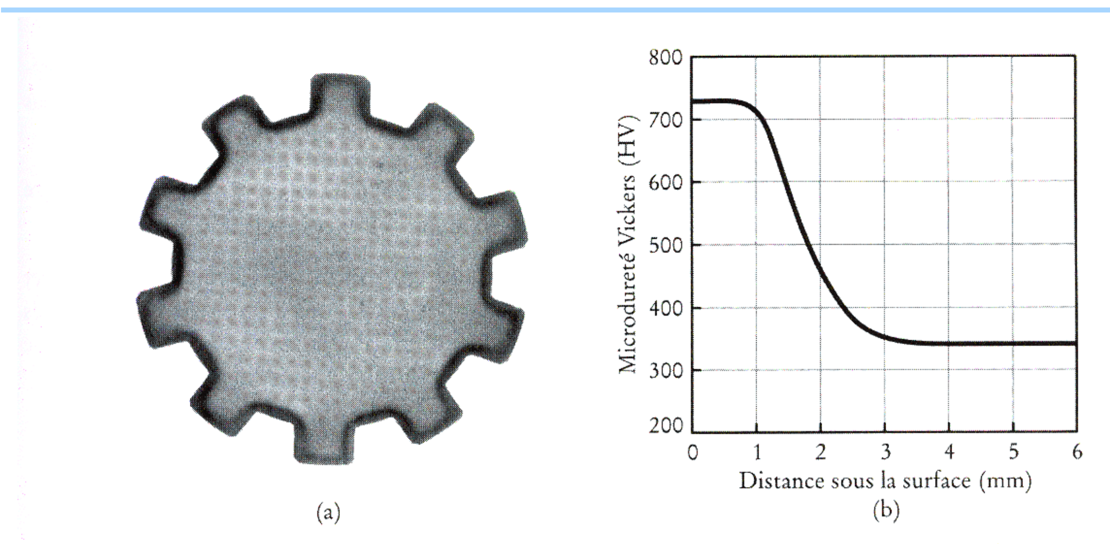


Figure 10.7 a) Influence d'une trempe superficielle par induction sur un arbre cannelé de boîte de vitesses. Les zones sombres superficielles ont une structure martensitique. b) Profil de dureté (de la surface vers le centre).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

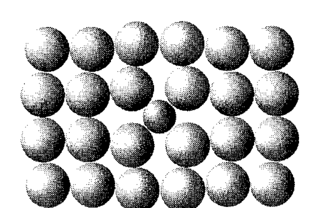


Traitements thermochimiques

MEC-200

- *On fait diffuser sous la surface de la pièce (1 à 2 mm) un élément en solution d'insertion.*

- Carbone (C) : carburation
- Azote (N) : nitruration
- Carbone + azote : carbonitruration



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Traitements thermochimiques

MEC-200

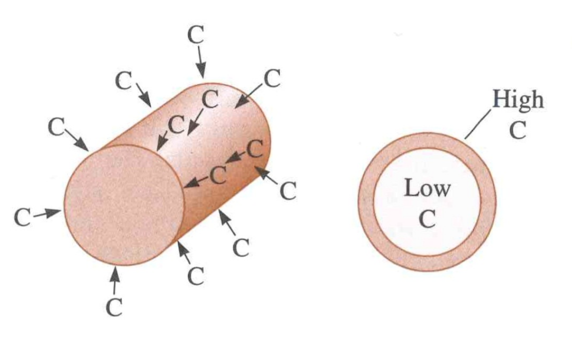


Figure 13-25
Carburizing of a low-carbon steel to produce a high-carbon, wear-resistant surface.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay

MEC-200

Traitements thermochimiques

carburation, nitruration et carbonitruration

- ***But :*** *obtenir une surface dure et résistante.*
- ***Processus :*** *diffusion d'un élément en solution d'insertion sous la surface de la pièce (1 à 2 mm).*
- ***Carbone (C) :*** *carburation ou cémentation*
  - *Aciers à bas carbone (0.10 à 0.25 %);*
  - *Opération dans le domaine austénitique : vers 900°C;*
  - *Milieux de carburation :*
    - *Solides : mélange de charbon et d 'oxyde de fer (cémentation),*
    - *Liquides : bains de cyanures fondus,*
    - *Gazeux : mélange de CO+ CO2 + hydrocarbures.*



MEC-200

Traitements thermochimiques

carburation, nitruration et carbonitruration

- ***Azote (N) :*** *nitruration*
  - *Aciers à moyen % carbone (0.40 %) + Al, Cr, Mn, Si.*
  - *Mise en solution dans le domaine α (500−570 °C). Solubilité max de N dans Fe = 0.4 % à 590 °C.*
  - *Formation des nitrures finement dispersés.*
  - *Durcissement par addition des formateurs de nitrures (Al, Cr, V).*
  - *Agents de nitruration :*
    - *Liquides : bains de cyanures fondus,*
    - *Gazeux : ammoniac.*
- ***Carbone + azote :*** *carbonitruration.*



Contenu

- Introduction
- Transformation des phases
  - Introduction
  - Cinétique des réactions : vitesse de transformation
  - Transformation isothermes :
    - Formation de la perlite;
    - Formation de la bainite;
    - Formation de la martensite et de la martensite de revenu;
    - Formation de la sphéroïdite.
- Traitement thermique des aciers
  - Traitement thermique dans la masse : trempabilité
  - Traitements de surface
  - Les récuits
  - Transformation en refroidissement continu



Les recuits

Principe

- *Chauffage jusqu'à obtention de la température désirée.*
- *Maintien de cette température pendant un temps d'incubation nécessaire.*
- *Refroidissement à température ambiante.*

Temps et température

Gradient de température entre extérieur et intérieure de la pièce.
Si gradient T°rapide => contraintes internes => fissures.
Accélérer le recuit en augmentant la T° => accélérer mécanisme de diffusion.

Buts

Élimine les contraintes résiduelles (de trempe, soudage, forgeage, laminage).
Diminution de la dureté.
Amélioration de la ténacité et de la ductilité (peuvent être usinés).
Produit une microstructure particulière.



Types de recuit et buts

MEC-200

- *Le recuit de recristallisation* *500 < T° < 700°C*

  Atténuer ou éliminer les effets d'écrouissage => adoucissement d'un métal préalablement déformé => augmentation de sa ductilité.

  Très utilisé dans le domaine de la mise en forme par déformations plastiques.

- *Le recuit de détente* *500 < T° < 650°C*

  Éliminer les contraintes résiduelles dans les pièces.

- *Pour les alliages ferreux*

  –Recuit de normalisation *T° > A_3 + 50ºC*

  Production de perlite fine et uniforme => Acier plus tenace.

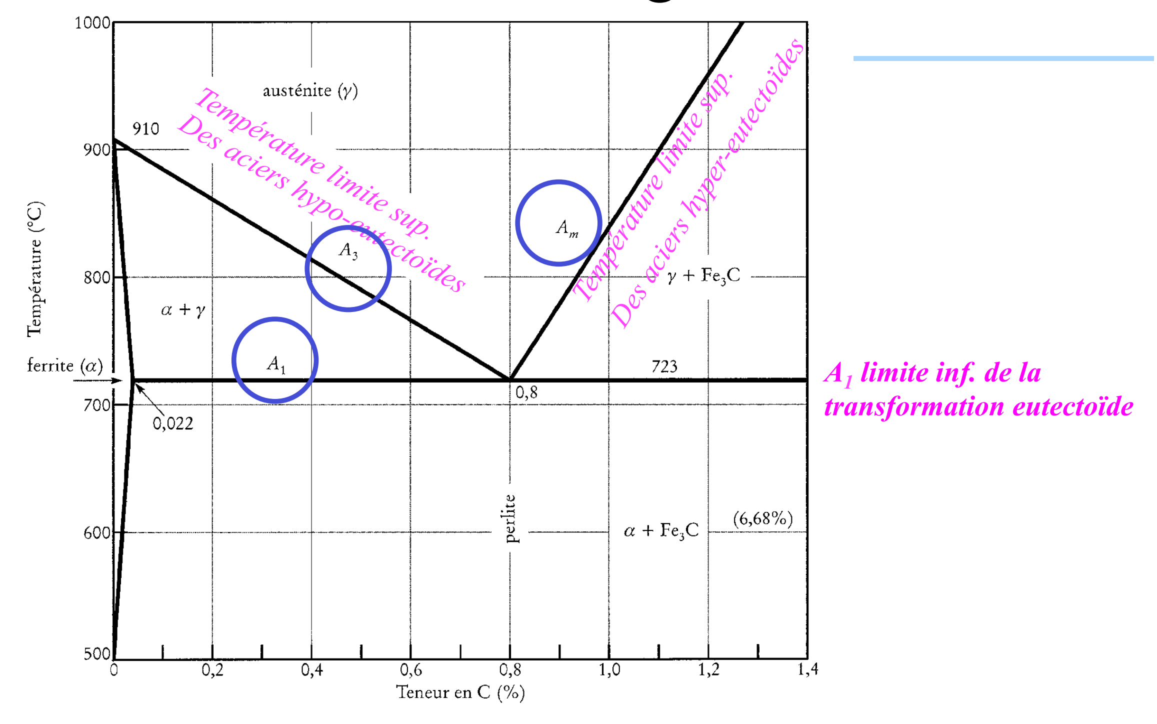
  –Recuit complet *T° > A_3 + 50ºC + refroidissement lent*

  Production de perlite grossière douce et ductile.

  –Recuit de sphéroidïsation *T° légèrement en dessous de A_1*

  Temps de recuit très long (< 20 h) coalescence de Fe3C => particules sphéroïdales.

Recuit des alliages à base de fer



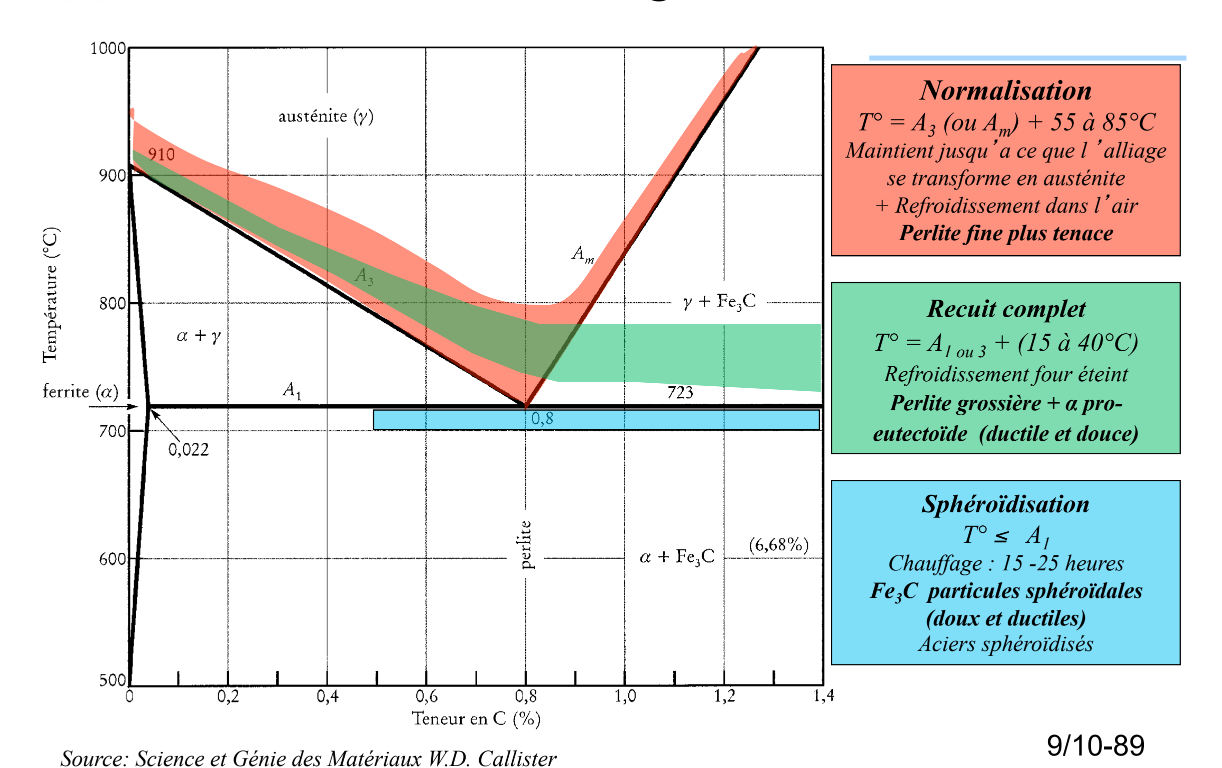
A_1 limite inf. de la transformation eutectoïde

Figure 6.18 Partie du diagramme Fe–C représentant les transformations des aciers à l'état solide.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot



Recuit des alliages à base de fer



Normalisation

T° = A_3 (ou A_m) + 55 à 85°C

Maintient jusqu'a ce que l'alliage se transforme en austénite

+ Refroidissement dans l'air

Perlite fine plus tenace

Recuit complet

T° = $A_{1\ ou\ 3}$ + (15 à 40°C)

Refroidissement four éteint

Perlite grossière + α pro-eutectoïde (ductile et douce)

Sphéroïdisation

T° ≤ A_1

Chauffage : 15 -25 heures

Fe_3C particules sphéroïdales (doux et ductiles)

Aciers sphéroïdisés

Source: Science et Génie des Matériaux W.D. Callister



Recuit des alliages à base de fer

MEC-200

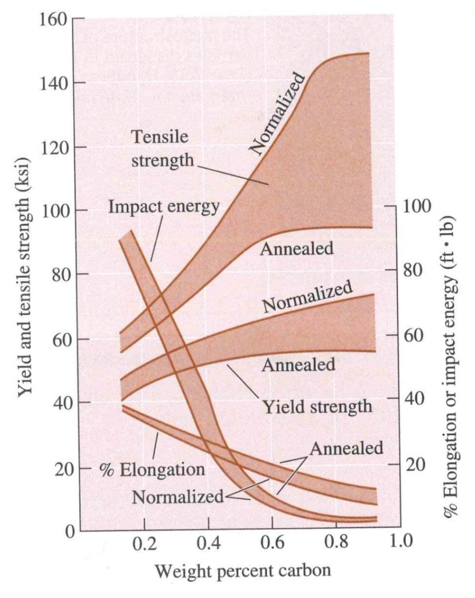


Figure 13-4
The effect of carbon and heat treatment on the properties of plain-carbon steels.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay

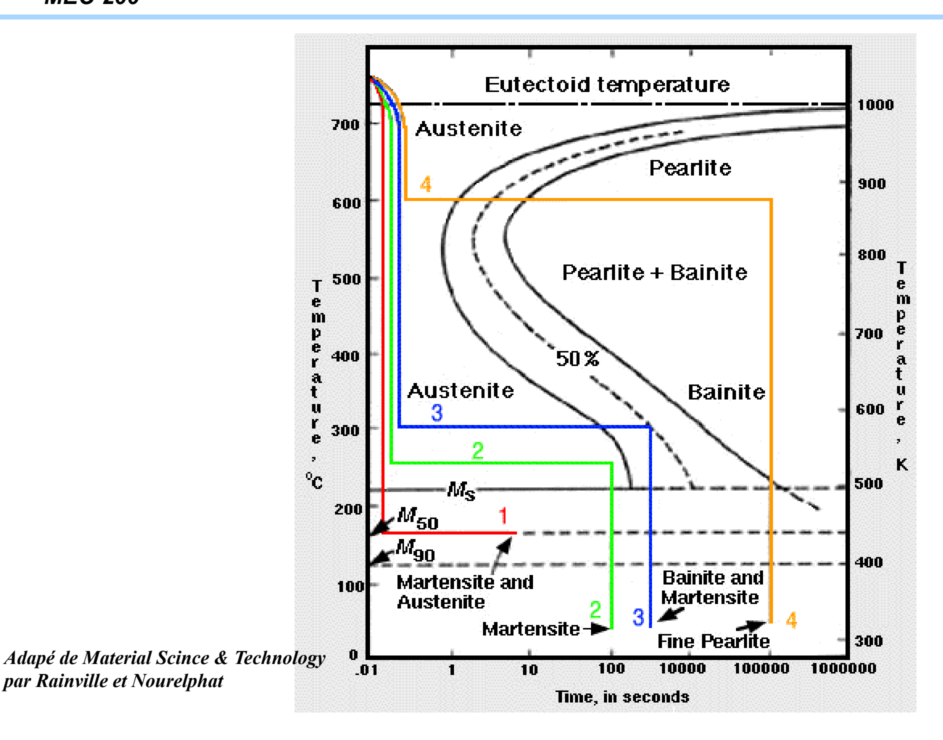


Contenu

- Introduction
- Transformation des phases
  - Introduction
  - Cinétique des réactions : vitesse de transformation
  - Transformation isothermes :
    - Formation de la perlite;
    - Formation de la bainite;
    - Formation de la martensite et de la martensite de revenu;
    - Formation de la sphéroïdite.
- Traitement thermique des aciers
  - Traitement thermique dans la masse : trempabilité
  - Traitements de surface
  - Les récuits
  - Transformation en refroidissement continu



Parcours temps-température et TTT



Adapé de Material Scince & Technology par Rainville et Nourelphat



Diagramme de transformation en refroidissement continu

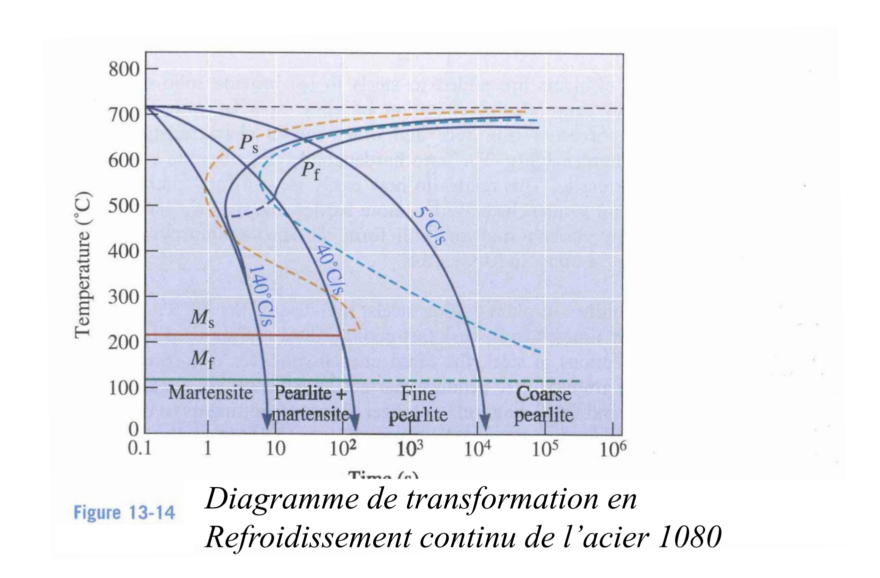


Figure 13-14 *Diagramme de transformation en Refroidissement continu de l'acier 1080*



Parcours temps-température et TTT

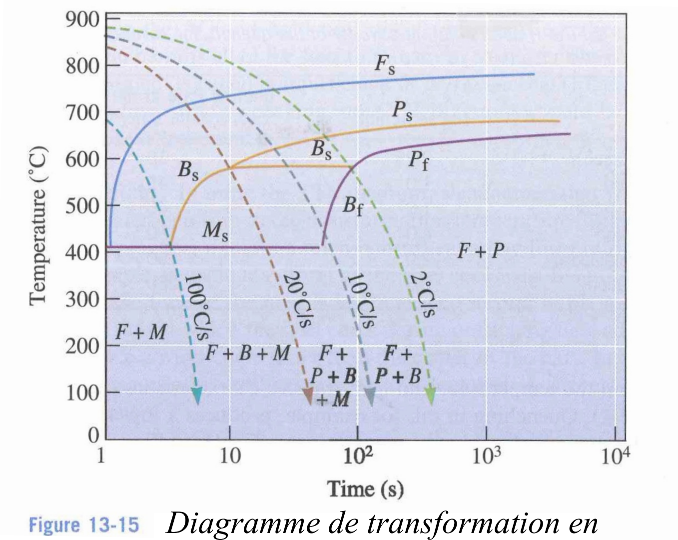


Figure 13-15 *Diagramme de transformation en Refroidissement continu pour un acier contenant 0.2% C*

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay



Qu’avons nous appris?

- Transformations isothermes
- Courbes TTT: formation de
  - Formation de perlite
  - Formation de bainite
  - Formation de Martensite
  - Revenu
- Traitements thermiques
  - Trempabilité
  - Soudabilité
  - Traitements de surface
  - Transformations en refroidissement continu